

# یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع با در نظر گرفتن

## نفتكش های میانی

زهرا توکلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

علیرضا رشیدی کمبجان (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، فیروزکوه، ایران

Email: rashidi@azad.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۸

### چکیده

تأمین انرژی در دنیای امروزه از راه ها و مواد مختلفی صورت می پذیرد که در این میان گاز طبیعی به سرعت در حال به دست آوردن نقش برجسته به عنوان یک منبع انرژی در سراسر جهان است. استفاده از حمل و نقل دریایی و تعیین مسیر بهینه کشتی های باربری از متداول ترین روش های حمل و نقل مواد در زنجیره های تامین سوخت های فسیلی از جمله گاز محسوب می گردد. در این پژوهش یک مدل ریاضی زنجیره تامینی سه سطحی شامل سطوح پورت مبدأ، نفتكش های میانی و پورت مقصد طراحی شده است. به منظور طراحی مسیرهای بهینه در یک زنجیره تامین گاز مایع، یک سیستم برنامه ریزی حمل و نقل با در نظر گرفتن نفتكش های میانی برای حداکثر کردن کارآیی زنجیره در نظر گرفته شد. به این منظور چارچوب بهینه ای برای حمل و نقل گاز مورد نیاز در محل های مصرف از طریق ناوگان حمل و نقل دریایی ارائه خواهد شد. هدف یافتن مقدار بهینه گاز انتقالی به نفتكش ها و پورت مقصد است تا علاوه بر تامین تقاضا هزینه های انبارش کمینه گردد.

با توجه به سخت بودن حل مدل ریاضی، الگوریتم های فرا ابتکاری شبیه سازی تبرید تدریجی و تکامل تفاضلی جهت حل مدل ارائه شده اند. سپس جهت کارآیی الگوریتم های پیشنهادی، مساله را در سائز کوچک با جواب های نرم افزار GAMS مقایسه کردیم سپس در سائز بزرگ به مقایسه دو الگوریتم پرداخته شد و مشاهده شد که با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی جواب های بهتری در زمان معقولی حاصل می گردد.

واژه های کلیدی: زنجیره تامین گاز مایع، نفت کش های میانی، مسیریابی، الگوریتم های فرا ابتکاری

## ۱. مقدمه

در سال های اخیر به دلیل افزایش جمعیت کره زمین، توسعه صنعت و غیره، تقاضا برای انرژی افزایش یافته است. برخی از منابع انرژی مانند زغالسنگ، نفت و غیره به دلیل قیمت بالا و ملاحظات زیست محیطی کمتر مورد استفاده قرار می گیرند و برای این منظور از انرژی های جایگزین استفاده می شود. یکی از مهم ترین انرژی های جایگزین، گاز طبیعی است. براساس پیش بینی های صورت گرفته، مصرف گاز طبیعی در سال ۲۰۲۰، ۲۸٪ از کل انرژی را در بر خواهد گرفت، که این مقدار مصرف در سال ۱۹۹۹، ۲۳٪ از کل انرژی بوده است [Energy Info, 2007]. برای مسافت های کوتاه، از لوله های انتقال جهت جابجایی گاز طبیعی استفاده می شود، ولی با افزایش مسافت، انتقال از طریق لوله هزینه بر بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. بنابراین باید از جایگزین های دیگری برای این منظور استفاده نمود. صنعت ناوگان مستقل دریایی، کشتی های ساخته است که از عهده این مشکل برآمده و جایگزین بسیار مناسبی برای انتقال گاز به جای لوله است و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. این کار با استفاده از سرد کردن گاز طبیعی تا دمای  $C -162$  صورت می پذیرد [Energy Info, 2007]. در این دما گاز به حالت مایع در می آید که اصطلاحاً به آن گاز طبیعی مایع می گویند. علاوه بر این، با انجام این کار، از حجم گاز به میزان قابل توجهی کاسته می شود و حمل و نقل و ذخیره سازی آن بسیار اثربخش تر می گردد. به دلیل طولانی بودن برخی از مسیرها، امکان برآورده کردن تقاضای مقاصد از مبدا دشوار و هزینه بر است، بنابراین در نظر گرفتن نفتکش های میانی، تاثیر قابل توجهی در کاهش هزینه ها و برآورده کردن تقاضا خواهد داشت.

از جمله مهم ترین سوالات در زنجیره های تامین، نحوه برقراری ارتباط بهینه بین سطوح زنجیره و انتقال مواد بین آنهاست. استفاده از حمل و نقل دریایی و تعیین مسیر بهینه کشتی های

باربری از متداول ترین روش های حمل و نقل مواد در زنجیره های تامین سوخت های فسیلی از جمله گاز محسوب می گردد. به همین دلیل از تکنیک های مسیریابی جهت تعیین مسیرهای بهینه کشتی های موجود برای برقراری ارتباط بین سطوح مبدا و نفتکش های میانی و همچنین مسیرهای بهینه از نفتکش های میانی تا مقصد استفاده خواهد شد.

## ۲. ادبیات موضوع

انرژی یک عامل اساسی در سیستم های تولیدی و خدماتی است. تأمین انرژی در دنیای امروزه از راه ها و مواد مختلفی صورت می پذیرد که در این میان گاز طبیعی به سرعت در حال به دست آوردن نقش برجسته به عنوان یک منبع انرژی در سراسر جهان است [German, 2005]. با این حال، با توجه به عدم تعادل محلی، تطبیق عرضه و تقاضا برای گاز طبیعی مستلزم حمل و نقل آن از مکان های با مازاد عرضه به مکان های با تقاضای بیش از حد است. در فواصل کوتاه حمل و نقل گاز طبیعی توسط خطوط لوله انجام می شود. در فواصل طولانی تر در قالب گاز طبیعی مایع (LNG) توسط کشتی های اقیانوس پیما حمل و نقل انجام می شود [Tusiani and Shearer, 2007].

زنجیره تامین سطح گسترده ای از مدل های بهینه سازی برای یک یا چند کالا را در ادبیات موضوع دربر می گیرد. در دهه گذشته، تمرکز بیشتری برای توسعه روش زنجیره تامین در سیستم های انرژی شده است که یکی از بخش های این مطالعات مربوط به زنجیره تامین و مسیریابی گاز طبیعی است [Kim, Seo and Durrer and Chang, 2016, Bittante et al. 2017]. Slater ادبیات تحقیق در عملیات مربوط به نفت و تولید گاز طبیعی را مورد بررسی قرار می دهند. با توجه به افزایش تقاضای LNG در سراسر جهان، مطالعات اخیر در بهینه سازی زنجیره عرضه LNG در سطح برنامه ریزی استراتژیک و تاکتیکی افزایش یافته است.

## یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

و همکاران. یک مدل بهینه سازی عدد صحیح مختلط برای یک نسخه غنی تر از LNG-IRP توسعه دادند و در مورد اجرای نرم افزار پشتیبانی تصمیم گیری LNG Scheduler بحث کردند [Fodstad et al. 2010].

Polonara و Arteconi طرح بالقوه LNG به عنوان سوخت خودرو را بیان کرده و به بررسی جنبه های مثبت و منفی آن و مقایسه روش های مختلف تامین با اشاره به سناریو ایتالیایی پرداختند [Polonara and Arteconi, 2013].

Josephine و همکاران یک مدل بهینه سازی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط در مقیاس بزرگ برای شبکه پخش گاز مایع معرفی کردند. مطالعه آن ها در شرایط دنیای واقعی در ایالت پنسیلوانیا انجام شده است. [Josephine et al. 2014]. در زمینه ی

بهینه سازی زنجیره تامین گاز، مطالعات محدودی انجام شده است. در سال های اخیر مطالعاتی در بهینه سازی انتقال گاز مایع در زنجیره تامین با استفاده از کشتی انجام شده است که از جمله آن، می توان به مطالعات Grønhaug و همکاران، Norstad و

همکاران، Christiansen و همکاران، Halvorsen و Fagerholt و Stålhane و همکاران اشاره نمود. Elia و همکاران یک برنامه ریزی استراتژیک برای بهینه سازی شبکه گاز طبیعی مایع ارائه داده و با استفاده از روش حل افق چرخش آن

را حل کردند. مساله برای مطالعه موردی شهر پنسیلوانیا مورد استفاده قرار گرفته است که سیاست های مختلف توسط این مساله بررسی و اثرات آن بر عملکرد اقتصادی سنجیده می شود [Elia et al. 2014]. Berle و همکاران آسیب پذیری زنجیره

تامین گاز طبیعی مایع را با استفاده از یک رویکرد نوین مورد بررسی قرار دادند [Berle and et al. 2013]. ابتدا سنجه های کمی را تعریف کرده و مقادیر ریسک اختلال و برطرف کردن آنها را اندازه گیری کردند. Agostinho و همکاران مساله

مسیریابی موجودی از طریق دریا را در شرایط عدم قطعیت در شرایط آب و هوایی و زمان های کشتی رانی و زمان های انتظار برای نخستین بار مورد بررسی قرار دادند [Agostinho et al.

برنامه ریزی استراتژیک معمولاً شامل تصمیم گیری در مورد سرمایه گذاری در دارایی های فیزیکی، مانند کشتی های LNG، پایانه های مایع و تبدیل گاز و شرایط قراردادی و شرایطی مانند مدت زمان، حجم، و بندر مقصد می شود [Anderson, 2010].

Özelkana و همکاران (۲۰۰۸) از یک مدل بهینه سازی قطعی برای تجزیه و تحلیل طراحی ترمینال LNG استفاده کرده اند [Özelkana and et al. 2008]. Rodríguez یک مدل واقعی برای ارزیابی انعطاف پذیری قراردادهای بلند مدت LNG توسعه داده است [Rodríguez, 2008]. Abadie و

Chamorro با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو به ارزیابی سرمایه گذاری گاز طبیعی، شامل یک کارخانه LNG پرداختند [Lai, Abadie and Chamorro, 2009].

یک مدل واقعی برای ارزیابی ارزش ذخیره سازی LNG در پایانه های تولید گاز را توسعه دادند [Lai et al. 2011].

برنامه ریزی تاکتیکی، شامل تصمیماتی مانند زمانبندی ناوگان کشتیرانی، راه ها، و برنامه های تحویل سالانه است. Kaplan و همکاران، Koenigsberg و Lam و Koenigsberg و Meyers مرحله حمل و نقل زنجیره تامین LNG با استفاده از

شبکه صف و مدل های شبیه سازی و در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان پردازش را نشان دادند.

تحقیقات اخیر بر ترکیب مسیریابی کشتی و مسئله مدیریت موجودی در زنجیره تامین LNG تمرکز دارد و همچنین به گسترش زمان بندی دریایی و مسیر یابی ادبیات کلاسیک می - پردازد (بررسی شده توسط Ronen و Christiansen و

همکاران Grønhaug و همکاران مسئله مسیریابی موجودی LNG (LNG-IRP) را معرفی کردند [Grønhaug and et al., 2009]. این مسئله شامل به حداکثر رساندن سود طراحی مسیره های تحویل کشتی LNG و زمانبندی، تولید LNG و

طرح های تولید گاز و اهداف موجودی ترمینال می باشد. Grønhaug و همکاران. یک روش شاخه و قیمت برای مسئله مشابه پیشنهاد کردند [Grønhaug et al. 2010]. Fodstad.

## زهرا توکلی، علیرضا رشیدی کمیجان

از این رو، هدف از این تحقیق، ارایه یک مدل ریاضی جهت انتقال گاز مایع با در نظر گرفتن نفتکش‌های میانی است. مفروضات که در این مقاله در نظر گرفته شده است:

✓ زنجیره تامین مورد نظر در این پژوهش دربرگیرنده سطوح پورت مبدا، نفتکش‌های میانی و پورت مقصد می‌باشد. همچنین این زنجیره تامین تک‌محصولی و چنددوره‌ای در نظر گرفته شده است.

✓ در این پژوهش چند پورت مبدا و چند نفتکش میانی و چند پورت مقصد در نظر گرفته شده است.

✓ در ابتدای دوره برنامه ریزی، تمام کشتی‌ها در پورت‌های مبدا هستند.

✓ هر کشتی پس از تخلیه کامل کارگوها به یکی از پورت‌های مبدا باز می‌گردد.

✓ هر نفتکش پس از تخلیه کامل کارگوها به مکان اولیه خود باز می‌گردد.

✓ هر کشتی پس از خروج از پورت مبدا و بازگشت به یکی از پورت‌های مبدا دیگر خارج نمی‌شود.

✓ هر نفتکش پس از خروج و بازگشت به مکان اولیه خود دیگر خارج نمی‌شود.

✓ تعداد کشتی‌های قابل استفاده برای حمل و نقل از پیش تعیین شده می‌باشد.

✓ امکان خرابی وسایل نقلیه در پژوهش در دست در نظر گرفته نشده است.

✓ به منظور بهینه‌سازی فرآیند حمل و نقل در لایه اول و برقراری ارتباط بین سطوح مبدا و نفتکش‌های میانی و همچنین از نفتکش‌های میانی تا پورت مقصد از تکنیک‌های مسیریابی بهره گرفته می‌شود.

✓ امکان انبارش گاز در پورت‌های مقصد در نظر گرفته شده است.

2015]. یک مدل برنامه ریزی عدم قطعیت دو مرحله‌ای در نظر گرفته شده است که مرحله اول تصمیمات مسیریابی، بارگیری و تخلیه و مرحله دوم، تصمیمات زمان بندی و موجودی را در بر می‌گیرد.

Shao و همکاران روش‌هایی در جهت بهبود روش‌های قبل برای مساله‌ی مسیریابی موجودی گاز مایع ارائه نمودند. با توجه به عملکرد ضعیف رویکرد تجزیه دانتزیگ برای روش‌های دقیق، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ابتکاری پیشرفته توسعه داده شده و یک استراتژیک ابتکاری ترکیبی به منظور دست‌یابی به روش‌های بهبود یافته در زمان محاسباتی کوتاه ارائه گردید [Shao et al. 2015 al.]. Jokininen و همکاران یک مدل ریاضی برای زنجیره تامین گاز طبیعی مایع با هدف کمینه کردن هزینه‌ها شامل سوخت ارائه کردند. مدل ارائه شده با قیمت‌های مختلف گاز مایع اجرا و نتایج در حالات مختلف مورد بحث و بررسی واقع شد [Jokininen et al. 2015].

### ۳. تعریف مساله

در مقالات موجود بهینه‌سازی زنجیره گاز مایع با در نظر گرفتن مسیریابی کشتی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که انتقال مستقیم گاز مایع از مبدا تا مقصد در فواصل طولانی از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست، ضرورت استفاده از نفتکش‌های میانی مطرح می‌گردد که در هیچ یک از مقالات مرتبط بررسی نشده است. در نتیجه در این پژوهش به بررسی یک مدل ریاضی زنجیره تامین سه سطحی شامل سطوح پورت مبدا، نفتکش‌های میانی و پورت مقصد پرداخته می‌شود که به منظور طراحی مسیرهای بهینه در یک زنجیره تامین گاز مایع، یک سیستم برنامه‌ریزی حمل و نقل با در نظر گرفتن نفتکش‌های میانی برای حداکثر کردن کارایی زنجیره در نظر گرفته شده و از تکنیک‌های مسیریابی جهت تعیین مسیرهای بهینه کشتی‌ها برای برقراری ارتباط بین سطوح مبدا و نفتکش‌های میانی و همچنین مسیرهای بهینه از نفتکش‌های میانی تا مقصد استفاده می‌گردد.

یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

	پورت مقصد $j$ به پورت مقصد $i$ .
$I_{Cjt}$	هزینه نگهداری موجودی در پورت مقصد $j$ در دوره زمانی $t$ .
$SC_{jt}$	هزینه کمبود در پورت مقصد $j$ در دوره زمانی $t$ .
$D_{jt}$	تقاضای پورت مقصد $j$ در دوره زمانی $t$ .
$Cap_v$	ظرفیت حمل و نقل کشتی $v$ .
$Cap'_d$	ظرفیت تخلیه نفتکش میانی $d$ .
$Cap''_j$	ظرفیت تخلیه پورت مقصد $j$ .
$T^o$	زمان تخلیه.
<b>متغیرهای تصمیم:</b>	
$X_{idvt}$	اگر کشتی $v$ در دوره زمانی $t$ از پورت مبدا $i$ به سمت نفتکش میانی $d$ حرکت کند مقدار $1$ در در غیر این صورت $0$ .
$Y_{djt}$	اگر نفتکش میانی $d$ در دوره زمانی $t$ به سمت پورت مقصد $j$ حرکت کند مقدار $1$ در در غیر این صورت $0$ .
$Z_{jjr/dt}$	هرگاه نفتکش میانی $d$ در دوره $t$ از پورت مقصد $j$ به سمت پورت مقصد $j'$ حرکت کند مقدار $1$ در در غیر این صورت $0$ .
$N_{jdt}$	هرگاه نفتکش میانی $d$ در دوره $t$ از پورت مقصد $j$ به سمت مکان اولیه اش حرکت کند مقدار $1$ در در غیر این صورت $0$ .
$C_{idv}$	تعداد کارگوهایی که توسط کشتی $v$ از پورت مبدا $i$ به نفتکش میانی $d$ تخلیه می شوند.
$C'_{djt}$	تعداد کارگوهایی که از نفتکش میانی $d$ به پورت مقصد $j$ در دوره $t$ تخلیه می شوند.
$C''_{jjr/dt}$	تعداد کارگوهایی که توسط نفتکش میانی $d$ از پورت مقصد $j$ به $j'$ در دوره $t$ تخلیه می شوند.

✓ با توجه به حیاتی بودن نقش گاز، امکان تقاضای پس-افت یا از دست رفته با هزینه جریمه های سنگین در نظر گرفته شده است. در بخش بعدی مدلسازی مساله مورد نظر در این مقاله آورده شده است.

#### ۴. تعریف مدل

علائم و پارامترهای متعددی در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است که تعریف هر یک از آن ها در زیر آمده است:

مجموعه ها:	
$i$	مجموعه پورت های مبدا
$\{j, j' \in J\}$	مجموعه پورت های مقصد
$d$	مجموعه نفتکش های میانی
$t$	مجموعه دوره های زمانی
$v \in V_i$	مجموعه تمام کشتی ها
$i_v$	پورت مبدا اولیه کشتی $v$
$V_i$	مجموعه کشتی هایی که در آغاز دوره برنامه ریزی در پورت $i$ هستند.
پارامترها:	
$T_{idv}$	مدت زمانی که طول می کشد کشتی $v$ از پورت مبدا $i$ به نفتکش میانی $d$ برود.
$T'_{dj}$	مدت زمانی که طول می کشد نفتکش میانی $d$ به پورت مقصد $j$ برود.
$T''_{jjr/d}$	مدت زمانی که طول می کشد نفتکش میانی $d$ از پورت مقصد $j$ به پورت مقصد $j'$ برود.
$NC_v$	تعداد کارگوهای کشتی $v$ .
$Cost_{idv}$	هزینه حرکت کشتی $v$ از پورت مبدا $i$ تا نفتکش میانی $d$ .
$Cost'_{dj}$	هزینه حرکت نفتکش میانی $d$ به پورت مقصد $j$ .
$Cost''_{jjr/d}$	هزینه حرکت نفتکش میانی $d$ از

$SH_{jt}$	میزان کمبود در تقاضای پورت مقصد $j$ در دوره $t$ .
-----------	---

$Inv_{jt}$	موجودی در پورت مقصد $j$ در دوره $t$ .
------------	---------------------------------------

مدل سازی ریاضی :

$$\min \sum_i \sum_d \sum_v \sum_t Cost_{idv} X_{idvt} + \sum_d \sum_j \sum_t Cost'_{dj} Y_{djt} + \sum_j \sum_{j'} \sum_d \sum_t C''_{jj'dt} Z_{jj'dt} + \sum_t \sum_j IC_{jt} Inv_{jt} + \sum_t \sum_j SC_{jt} SH_{jt} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_d \sum_t X_{idvt} \leq 1 \quad \forall i, v \quad (2)$$

$$C_{idv} \leq Cap_v \sum_t X_{idvt} \quad \forall i, v, d \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_v C_{idv} \leq Cap'_d \quad \forall d \quad (4)$$

$$\sum_d Y_{dj(t-T'_{aj})} + \sum_{j' \neq j} \sum_d Z_{jj'd(t-T''_{jj'd})} \leq Cap''_j \quad \forall j, t \quad (5)$$

$$\sum_j Y_{djt} + \sum_j \sum_{j' \neq j} Z_{jj'dt} + \sum_j N_{jdt} \leq 1 \quad \forall d, t \quad (6)$$

$$\sum_{j' \neq j} Z_{jj'dt} + N_{jdt} = Y_{dj(t-T'_{aj})} + \sum_{j' \neq j} Z_{jj'd(t-T''_{jj'd})} \quad \forall j, t, d \quad (7)$$

$$\sum_j Y_{djt} = \sum_i X_{idv(t-T_{idv})} \quad \forall t, d, v \quad (8)$$

$$\sum_j \sum_t N_{jdt} = \sum_j \sum_t Y_{djt} \quad \forall d \quad (9)$$

$$\sum_d C'_{djt} + \sum_d \sum_{j' \neq j} C''_{jj'dt} + Inv_{j(t-1)} + SH_{jt} = D_{jt} + Inv_{jt} \quad \forall j, t \quad (10)$$

$$C_{idv} = NC_v \sum_t X_{idvt} \quad \forall i, d, v \quad (11)$$

$$\sum_j \sum_t C'_{djt} + \sum_j \sum_{j' \neq j} \sum_t C''_{jj'dt} = \sum_i \sum_v \sum_j \sum_t C_{idv} Y_{djt} \quad \forall d \quad (12)$$

$$Y_{djt} \leq C'_{dj(t+T'_{aj})} \quad \forall d, j, t \quad (13)$$

$$Z_{jj'dt} \leq C''_{jj'd(t+T''_{jj'd})} \quad \forall j, j', j \neq j', d, t \quad (14)$$

$$C'_{djt} \leq MY_{aj(t-T'_{aj})} \quad \forall d, j, t \quad (15)$$

$$C''_{jj'dt} \leq MZ_{jj'd}(t-T''_{jj'd}) \quad \forall j, j', j \neq j', d, t \quad (16)$$

$$X_{idvt}, Y_{djt}, Z_{jj'dt}, N_{jdt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l, t, s \quad (17)$$

$$C_{idv} Y_{djt} = C_{idv} \quad \forall i, j, d, v, t \quad (18)$$

$$C_{ijdvt} \geq C_{idv} - (M(1 - Y_{djt})) \quad \forall i, j, d, v, t \quad (19)$$

$$C_{ijdvt} = C_{idv} \quad \forall i, j, d, v, t \quad (20)$$

$$C_{ijdvt} \leq M Y_{djt} \quad \forall i, j, d, v, t \quad (21)$$

میانی بخواهد در زمان  $t$  به سمت پورت مقصد  $j$  حرکت کند باید در زمان مناسبی قبل از  $t$  کشتی  $v$  از پورت مبدا خود خارج شده و به نفتکش میانی رسیده باشد. محدودیت (۹) بیان می‌کند اگر یک نفتکش به مکان اولیه خود باز گردد حتماً باید از مکان اولیه خود خارج شده باشد. محدودیت (۱۰) مربوط به رابطه تعادلی کمبود و تقاضا است. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند اگر یک کشتی از پورت مبدا خود خارج شد، تمام کارگوهایش را در نفتکش  $d$  تخلیه نماید. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند اگر یک نفتکش از مکان خود خارج شد، تمام کارگوهایش را در پورت های مقصد  $j$  و  $j'$  تخلیه نماید. بر مبنای محدودیت های (۱۳) و (۱۵)، هرگاه یک نفتکش از مکان خود به سمت پورت مقصد  $j$  حرکت می‌کند حتماً حداقل یک کارگوباید در آن پورت خالی کند. و همچنین بر مبنای محدودیت (۱۴) و (۱۶)، هرگاه یک نفتکش از پورت مقصد  $j$  به سمت پورت مقصد  $j'$  حرکت می‌کند حتماً حداقل یک کارگوباید در آن پورت خالی کند. محدودیت های (۱۸) تا (۲۱) برای خطی سازی محدودیت (۱۲) هستند که مدل را از حالت غیرخطی خارج می‌کند.

## ۵. نتایج محاسباتی

در بخش قبل مدلسازی ریاضی شرح داده شد. در این فصل ابتدا به بررسی حل مثال در نرم افزار گمز پرداخته، در ادامه نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری فوق بررسی خواهد شد و سپس نتایج حل عددی برای نمونه مسایل مختلف ارایه می‌گردد. در انتها نیز تحلیل انالیز حساسیت انجام شده روی سه

تابع هدف این مدل به صورت کمینه سازی هزینه ها است که عبارت اول مربوط به هزینه حرکت کشتی از پورت مبدا به نفتکش، عبارت دوم هزینه حرکت نفتکش تا پورت مقصد  $j$  و عبارت سوم هزینه حرکت نفتکش از مقصد  $j$  به مقصد  $j'$  است. و همچنین عبارت چهارم بیانگر هزینه نگهداری موجودی در پورت مقصد  $j$  و عبارت اخر نیز هزینه کمبود در تقاضای پورت مقصد  $j$  را نشان می‌دهد. محدودیت (۲) بیان می‌کند که یک کشتی در طول افق برنامه ریزی حداکثر یک بار از پورت مبدا خود خارج شود. محدودیت (۳) ظرفیت کشتی را نشان می‌دهد، بر مبنای این محدودیت تعداد کارگوهای حمل شده از پورت مبدا تا نفتکش میانی حداکثر برابر با ظرفیت کشتی است. محدودیت (۴) مربوط به ظرفیت تخلیه نفتکش  $d$  است. بر این اساس تعداد کارگوهایی که از پورت های مبدا و کشتی های مختلف به هر نفتکش می‌رسد حداکثر می‌تواند برابر با ظرفیت نفتکش باشد. محدودیت (۵) بیانگر ظرفیت تخلیه پورت مقصد  $j$  است. این محدودیت نشان می‌دهد که هر پورت مقصد حداکثر گنجایش تخلیه چند نفتکش را خواهد داشت. بر اساس محدودیت (۶)، در یک دوره زمانی نفتکش میانی از پورت مقصد  $j$  حداکثر می‌تواند یا به سمت پورت تخلیه دیگری نظیر  $j'$  برود، یا به مکان اولیه خود بازگردد. محدودیت (۷) بیان می‌کند اگر یک نفتکش بخواهد در زمان  $t$  پورت مقصد  $j$  را ترک کند (به سمت پورت تخلیه دیگر یا مکان اولیه بازگردد) باید در زمان مناسبی قبل از زمان  $t$  پورتهی را به مقصد  $j$  ترک کرده و به  $j$  رسیده باشد. بر مبنای محدودیت (۸)، اگر نفتکش

## زهرا توکلی، علیرضا رشیدی کمیجان

پارامتر کلیدی یعنی تقاضا، ظرفیت کشتی و ظرفیت نفتکش همراه با نمودارهای مربوطه به تفصیل بیان می‌گردد.

### ۱-۵ حل دقیق مساله با نرم افزار GAMS

مدل ریاضی ارائه شده در فصل قبل یک برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط بوده که تبدیل به یک مدل خطی گردید. برای حل کردن این گونه مسائل تکنیک های بهینه سازی زیادی چون شاخه و کران، شاخه و برش و شاخه و قیمت توسعه داده شده است. و با توجه به این که هرچه سایز مسئله بالاتر می‌رفت زمان حل به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کرد و در سایزهای بزرگ نرم افزار قادر به حل آن نبود لذا این مساله NP-hard است. همچنین در اکثر مساله های مسیریابی اثبات پیچیدگی مدل آمده و سپس از روش های فرا ابتکاری برای حل مساله در سایز بزرگ استفاده شده است [Julai and Tavakkoli-Moghaddam, 2017, Zhalechian, Tavakkoli-Moghaddam, Zahiri & Mohammadi. 2016]. این مدل به وسیله نرم افزار GAMS 24.1 با حل کننده CPLEX کد شده است. اعتبار و قابلیت اطمینان مدل ارائه شده به وسیله یک سری داده های تصادفی تولید و روی یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با پردازنده ۳ گیگاهرتز و حافظه داخلی

۴ گیگا بایت سنجیده شده است. با وجود تلاش زیاد برای حل نمونه های با سایز بالا به علت زمان محاسباتی خیلی زیاد، ناموفق بوده است. به علت این محدودیت، ما دو الگوریتم فرابتنکاری کارای تکامل تفاضلی و شبیه سازی تبرید را توسعه داده ایم که جواب های مناسب خوبی را در زمان های معقول برای برای مسائل با سایز واقعی را پیدا کرده است. به علاوه ارزیابی کردن عملکرد این الگوریتم های فرا ابتکاری و مقایسه بین جواب های بدست آمده این دو الگوریتم و جواب های دقیق مساله در سایز کوچک در نرم افزار GAMS انجام شده است در ادامه یک مساله آزمایشی را به تفصیل شرح می‌دهیم. در جدول (۱) هفت مساله سایز کوچک با نرم افزار GAMS حل شده است که مقادیر تابع هدف در آن آمده است. شماره بندی مسایل بدین گونه رایج می‌شود که ابتدا تعداد پورت مبدا را نوشته سپس یک علامت # گذاشته و سپس تعداد پورت های مقصد، تعداد کشتی ها، تعداد نفت کش ها و در انتها پریود های زمانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر تابع هدف با نرم افزار GAMS

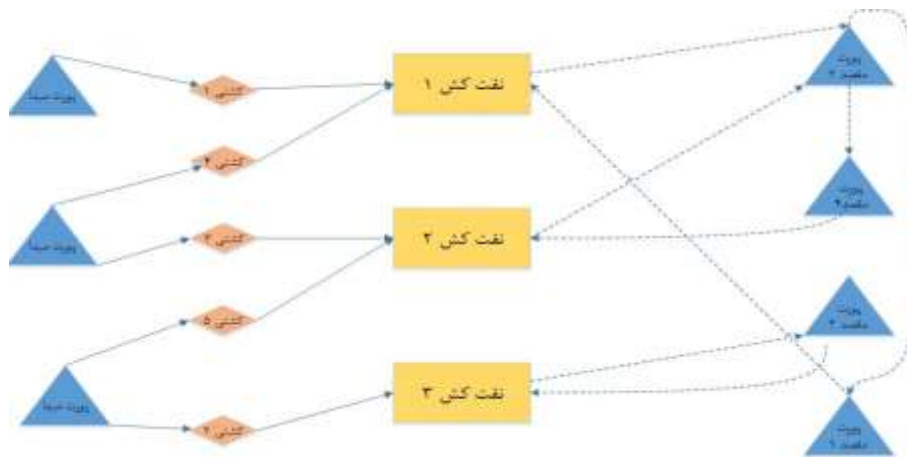
$i*j*v*d*t$	مقدار تابع هدف	زمان حل
۲#۳#۳#۲#۶	۳۴۱۸۳	۳۰۰۰ ثانیه
۳#۳#۲#۳#۶	۳۶۳۰۰	۳۹۰۰ ثانیه
۳#۴#۵#۳#۸	۳۷۵۴۵	۴۸۰۰ ثانیه
۴#۴#۷#۳#۸	۴۱۵۷۰	۵۲۲۰ ثانیه
۴#۵#۸#۴#۸	۴۴۲۸۰	۵۵۸۰ ثانیه
۵#۵#۱۰#۴#۸	۵۱۳۰۰	۶۶۰۰ ثانیه
۵#۶#۱۲#۴#۱۰	۵۷۵۶۰	۷۲۰۰ ثانیه



## یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

در جدول ذیل مسیریابی پورت های مبدأ تا نفتکش های میانی مسأله فوق بررسی شده است. بدین صورت که هر کشتی از پورت مبدأ مربوطه چه تعداد کارگو حاوی گاز مایع به نفتکش ها تخلیه می کند. به عنوان مثال نفتکش ۲ تعداد ۳۰ کارگو از کشتی ۳ و ۴۰ کارگو از کشتی ۵ دریافت می کند. که در جدول (۳) آمده است. همچنین در جدول (۴) ذیل نیز مسیریابی بین سطوح نفتکش تا پورت های مقصد از مساله فوق بررسی شده است. به عنوان مثال نفتکش ۱ تعداد ۱۰ کارگو در دوره ۵ در مقصد ۲ تخلیه می کند و سپس به سمت مقصد ۱ حرکت کرده و تعداد ۳۰ کارگوی دیگر نیز در دوره ۷ در این مقصد تخلیه و در انتها به سمت مکان اولیه خود باز می گردند.

در ادامه به تفصیل مساله ای با سایز  $3 \times 4 \times 5 \times 3 \times 8$  که نشان دهنده ۳ پورت مبدأ و ۴ پورت مقصد و ۵ کشتی و ۳ عدد نفت کش در ۸ پرپود زمانی است شرح داده خواهد شد در شکل (۱) نمای شماتیکی از جواب مساله فوق رسم شده است. به عنوان مثال کشتی ۳ و ۴ متعلق به پورت مبدأ ۲ بوده که کشتی ۳ در ابتدای دوره زمانی به سمت نفتکش ۲ حرکت کرده و کارگوهای گاز مایع را پس از پیمودن ۲ دوره زمانی تخلیه می کند. پس از رسیدن کشتی ۵، نفتکش ۲ به سمت مقصد ۲ حرکت کرده و پس از برآورده کردن تقاضای این مقصد به سمت مقصد ۴ رفته و کارگوهای مورد نیاز این مقصد را نیز تخلیه و سپس به سمت مکان اولیه خود باز می گردد.



شکل ۱. دیاگرام مساله ای با سایز  $3 \times 4 \times 5 \times 3 \times 8$

جدول ۲. تعداد کارگوهای ارسالی توسط هر کشتی

تعداد کشتی ها	نفتکش ۱					نفتکش ۲					نفتکش ۳				
	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو	تعداد کارگو
کشتی ۱	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
پورت مبدأ ۱	۲۰														
پورت مبدأ ۲						۲۰									
پورت مبدأ ۳											۳۰				
پورت مبدأ ۴											۴۰				

## زهرا توکلی، علیرضا رشیدی کمیجان

جدول ۳. تعداد کارگوهای ارسالی توسط هر نفتکش

نفتکش ۳	نفتکش ۲	نفتکش ۱
دوره ۷	دوره ۴	دوره ۵
دوره ۷	دوره ۷	دوره های زمانی
۳۰	۳۰	پورت مقصد ۱
۱۰	۴۰	پورت مقصد ۲
۷۰	۳۰	پورت مقصد ۳
		پورت مقصد ۴

و یا انتخاب نکردن جابجایی‌ها دارد و تا کنون روش دقیقی برای آن بوجود نیامده است و معمولاً برای هر مسأله با مقادیر مختلف برای آن، الگوریتم SA را اجرا می‌کنند. اگر  $T_0$  (دمای اولیه) خیلی بزرگ باشد، آنگاه  $e^{\frac{-\delta}{T}}$  نزدیک یک می‌شود و در نتیجه هر جابجایی که تابع هدف را بهبود ندهد، نیز پذیرفته می‌شود و به نوعی الگوریتم SA مانند الگوریتم کاهش عمل می‌کند. تابع احتمال تحول P به اندازه گراف همسایگی بحرانی است و آن نیازهای کلی روش را برای مقایسه حالات مختلف فراهم می‌کند. به دلیل اینکه احتمالات، وابسته به دما است، توابع احتمال مشابه برای تمامی مسایل بکار می‌رود و در نتیجه برنامه زمانی تبرید نیز با آن تنظیم می‌شود. در فرمول‌بندی اصلی روش که توسط کرک پاتریک انجام شده است، تابع احتمال  $P(e, e', T_k)$  با برقراری شرط  $e' < e$  تعریف شده است (یعنی حرکت نزولی باید برقرار باشد). در غیر اینصورت، احتمال برابر  $e^{\frac{(e-e')}{T_k}}$  (تابع پذیرش که به تابع بولتزمن معروف است) یا همان  $e^{\frac{-\delta}{k_B T}}$  خواهد بود که  $k_B$  یک ثابت فیزیکی به نام ثابت بولتزمن است و T یک پارامتر کنترل‌کننده متناظر با درجه حرارت سیستم فیزیکی است. با توجه به تابع پذیرش نتیجه می‌شود که افزایش کم در f بهتر مورد پذیرش قرار می‌گیرد تا حالتی که f افزایش زیادی دارد. همچنین در دمای ثابت، مقدار زیاد  $\delta$  منجر به احتمال کمتر پذیرش حرکت از جواب فعلی به یک همسایگی می‌شود و همانگونه که در تابع

### ۲-۵ الگوریتم‌های فراابتکاری

#### ۱-۲-۵ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

یکی از الگوریتم‌های ابتکاری که در حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی ترکیباتی به کار می‌رود، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تدریجی است. این روش به عنوان یک رویکرد غیرقطعی رایج موفق، برای اکثر اینگونه مسایل به کار گرفته شده است. شبیه‌سازی تبریدی یک روش جستجوی محلی است که سعی در به دست آوردن جواب بهینه سراسری دارد. جستجوگر SA، بطور گسترده‌ای در بهینه‌سازی مسایل گسسته کاربرد دارد [Varadharajan and Chandrasekharan, 2008]. در زیر دو روش کاهش درجه حرارت که در الگوریتم‌های SA به کار می‌روند، ذکر می‌شود:

روش اول به روش آرتس موسوم است. در این روش دما طبق رابطه زیر بعد از هر چند تکرار مشخص کاهش می‌یابد:

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{\left(1 + \frac{T_k \log(1+\delta)}{3\delta k}\right)} \quad (22)$$

که در آن  $\delta$  یک عدد کوچک مثبت است. (مقدار  $\delta = 0.1$  برای آن پیشنهاد شده است) و  $\delta k$  واریانس مقادیر تابع هدف است که در طی حلقه k به دست آمده است. روش دوم به روش هندسی موسوم است. در این روش نیز دما بعد از هر تکرار طبق رابطه زیر کاهش می‌یابد.  $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$  که در آن  $0 \leq \alpha \leq 1$  است. (مقادیر  $0.8 \leq \alpha \leq 1$  برای آن پیشنهاد شده است.) تعیین دمای اولیه  $T_0$  تأثیر زیادی در انتخاب کردن

## یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

نسبتی از تفاضل دو بردار جواب (بردار اول و دوم) را به یک بردار پایه (بردار سوم) اضافه می کند. عملیات جابجایی در DE به منظور ایجاد جمعیت فرزند از جمعیت آزمایشی به کار می رود، دو نوع جابجایی در این الگوریتم وجود دارد: جابجایی بینم و جابجایی نمایی. جابجایی بینم یکسری آزمایش های مستقل برنولی است که طی آن جمعیت فرزند از جمعیت آزمایشی به وجود می آید. عملیات جابجایی در واقع تنوع جمعیت را که پس از عملیات جهش بوجود آمده است را کنترل می کند. فرآیند انتخاب در DE با دیگر الگوریتم های تکاملی متفاوت است، در سایر الگوریتم های تکاملی افراد بازمانده برای نسل بعد به صورت احتمالی انتخاب می شوند در صورتی که در الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی این انتخاب به صورت انتخاب قطعی بین بردار والد و بردار فرزند با در نظر گرفتن برآزش آن دو صورت می گیرد.

پس به طور کلی در این الگوریتم ابتدا یک پاسخ موقت با استفاده از عملگر جهش ایجاد می شود و سپس با استفاده از عملگر تقاطع، پاسخ جدید ایجاد و ارزیابی می شود. اگر پاسخ جدید بهتر از پاسخ فعلی باشد، پاسخ جدید به جای پاسخ فعلی می نشیند. در غیر این صورت پاسخ فعلی می ماند.

۳-۵ تنظیم پارامتر الگوریتم ها و نتایج عددی  
در این بخش، عملکرد الگوریتم های فرا ابتکاری توسعه یافته بر روی تعدادی از مجموعه داده هایی که به طور تصادفی ایجاد شده اند در یک مطالعه مقایسه ای هم از نظر کیفیت راه حل و هم زمان محاسبه ارزیابی شده است. این مجموعه داده ها شامل نمونه های با اندازه کوچک تا نمونه های با اندازه بزرگ است. پارامترهای مورد نیاز در الگوریتم های شبیه سازی تبرید و تکامل تفاضلی نیز با استفاده از روش معروف سطح پاسخ تنظیم شدند که در جدول (۴) نشان داده شده اند.

همانگونه که واضح است، کارایی یک الگوریتم فرا ابتکاری به شدت به پارامترهای آن وابسته است به گونه ای که پارامترهای

پذیرش می بینیم وقتی T به سمت صفر میل می کند بیشتر جابجایی ها رد می شوند. در واقع با کاهش یافتن T احتمال پذیرش جوابهایی که تابع هدف را افزایش می دهند، کم می شود. بنابراین در SA برای جلوگیری از همگرایی پیش از موقع یا به عبارتی رسیدن به بهینه محلی، الگوریتم را با یک T نسبتاً بزرگ شروع می کنیم. الگوریتم با یک درجه حرارت ثابت شروع و به تدریج از درجه حرارت کم می شود و برای هر درجه T، تعداد مشخصی از همسایگی های جوابها مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۲-۲-۵ الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی (DE) اولین بار توسط استورن و پرایس در سال ۱۹۹۵ میلادی معرفی گردید. زمینه های استفاده از آن در حل مسایل مختلف، باعث رشد فزاینده ای در پذیرش آن از سوی جوامع تحقیقاتی گردیده است که این نکته گواهی بر سادگی و توانایی آن است. [Bergey and Ragsdaleb, 2005]

الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی همانند سایر الگوریتم های تکاملی با جمعیتی از افراد سروکار دارد که این افراد در فضای ژنتیک همان کروموزومها و در فضای حل مسأله مقادیر برداری جواب هستند. این الگوریتم جز آن دسته از الگوریتم هایی است که با متغیرهای حقیقی کار می کنند.

اولین گام در DE، کد نمودن متغیرهای مسأله در قالب بردارها یا کروموزوم های حامل جواب و به عبارت بهتر "نحوه نمایش جوابها" است، بر اساس این تعریف از متغیرها، می توان تابع برآزش را با توجه به اهداف مسأله تعریف نمود. عملگر جهش در الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی بر خلاف دیگر الگوریتم های تکاملی، نقش نسبتاً مهم تری نسبت به سایر عملگرها ایفا می کند، عملگر جهش نقش ایجاد تنوع در جمعیت را برعهده دارد که موجب بهبود عملکرد DE در رسیدن به جواب بهینه خواهد شد. در واقع الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی نام خود را از عملگر جهش تفاضلی خویش گرفته است. وقتی جمعیت اولیه تولید گردید، DE نسل اول را جهش داده و جمعیتی با NP عضو (به تعداد جمعیت نسل اولیه) تولید می کند. در واقع جهش تفاضلی

## زهرا توکلی، علیرضا رشیدی کمیجان

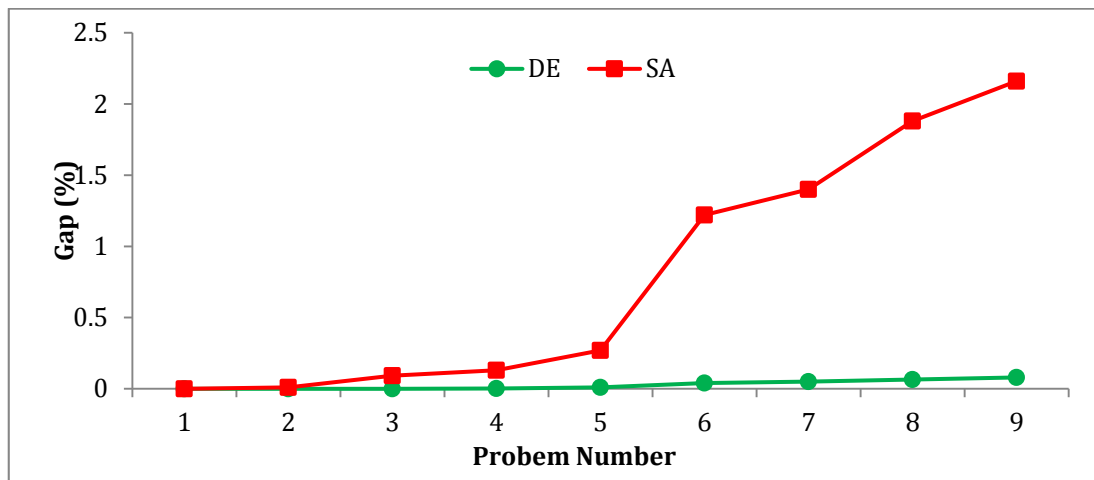
آمده در نرم افزار GAMS و الگوریتم فرا ابتکاری هستند. برای مسئله های بزرگ نیز به همین ترتیب یک فاصله بین الگوریتم های SA و DE به صورت  $100 \times$  [  $(Q_{DE} - Q_{SA}) / Q_{SA}$  ] ایجاد می شود که در آن  $G_{DE}$  و  $G_{SA}$  به ترتیب مقدار تابع هدف از الگوریتم های SA و DE هستند. در تمامی مسئله های آزمایشی DE بهتر از SA عمل می کند. درصد نسبی اختلاف ها برای پنج تکرار هر مساله خاص میانگین بوده است و میانگین درصد اختلاف نسبی ثبت شده است. میانگین درصد اختلاف های نسبی به وسیله حل کردن مساله های نمونه با استفاده کردن از الگوریتم های فرا ابتکاری شبیه سازی تبرید و تکامل تفاضلی بدست آمده است و همچنین میانگین زمان های محاسباتی مربوط به آن را در جدول (۵) و (۶) که به ترتیب برای سایز کوچک و سایز بزرگ است محاسبه شده است. زمان های محاسباتی مورد نیاز دو الگوریتم فرا ابتکاری استفاده شده در ستون آخر جدول (۵) و (۶) آمده است. زمان محاسبات الگوریتم های فرا ابتکاری ارائه شده با افزایش سایز مساله افزایش می یابد اما در سایزهای کوچک به صورت نسبی افزایش می یابد. این نتایج نشان می دهد که رویکردهای هر دو الگوریتم فرا ابتکاری می تواند جواب های نزدیک به بهینه در زمان معقول پیدا کند در حالی که الگوریتم تکامل تفاضلی در تمام مساله های انجام شده بهتر از الگوریتم شبیه سازی تبرید است. شکل (۲) میانگین درصد اختلاف های نسبی دو الگوریتم را با توجه به نرم افزار گمز نشان می دهد. شکل (۳) میانگین درصد اختلاف نسبی الگوریتم شبیه سازی تبرید در مقایسه با الگوریتم تفاضل تکاملی به تصویر می کشد. از طرف دیگر شکل (۴) زمان CPU الگوریتم های شبیه سازی تبرید و تکامل تفاضلی نشان می دهد که در آن نسبتاً زمان CPU الگوریتم شبیه سازی تبرید کمتر است

مختلف ممکن است جواب های کاملاً متفاوتی با کیفیت های متفاوت تولید کنند. بنابراین اگر پارامترها به طور صحیح تنظیم نشوند، نمی توانیم به جواب بهینه دست یابیم. روش سطوح پاسخ برای تخمین بهینه پارامترهای مختلف تأثیر گذار بر یک فرآیند بکار می رود. در این روش، از روش معادله رگرسیونی برای ارزیابی سطوح مختلف پارامترها استفاده می شود. روش کار بدین گونه است که یک سری از سطوح مختلف پارامترهای مؤثر الگوریتم بر مبنای شاخص های ورودی (معمولاً از مقدار تابع هدف استفاده می شود) مورد بررسی قرار گرفته و با برازش بهترین معادله رگرسیونی بر سطوح مختلف پارامترها، مقادیر مطلوب برای تنظیم پارامترها پیشنهاد می شود. قبل از هر چیزی باید پارامترهایی که به صورت آماری تأثیر مهمی بر رفتار الگوریتم دارند را پیدا کرد. برای هر یک از پارامترهای مؤثر دو سطح در نظر گرفته می شود که می توان آن را برابر ۱- هنگامی که پارامتر در سطح پایین و برابر ۱+ هنگامی که پارامتر در سطح بالاست. اکنون در این قسمت تنظیم پارامترهای مربوط به الگوریتم های SA و DE به تفکیک ارایه می شود. همچنین سودکد و فرآیند های هر دو الگوریتم در پیوست الف آورده شده است. راه حل های SA و DE با راه حل های بهینه به دست آمده از نرم افزار GAMS برای مسئله های کوچک تا ۱۰ نوع مساله مقایسه می شوند. از این رو برای مسئله های آزمایشی بزرگتر مقایسه میان SA و DE فقط گزارش داده می شوند. در نتیجه برای مسئله های کوچک، فاصله ای میان الگوریتم های SA و DE با GAMS از طریق درصد اندازه نسبی گپ ایجاد می شود که به صورت  $100 \times$  [  $(G_{GAMS} - G_{Meta}) / G_{Meta}$  ]  $G_{Meta}$  و  $G_{GAMS}$  به ترتیب مقدار تابع هدف از راه حل بدست

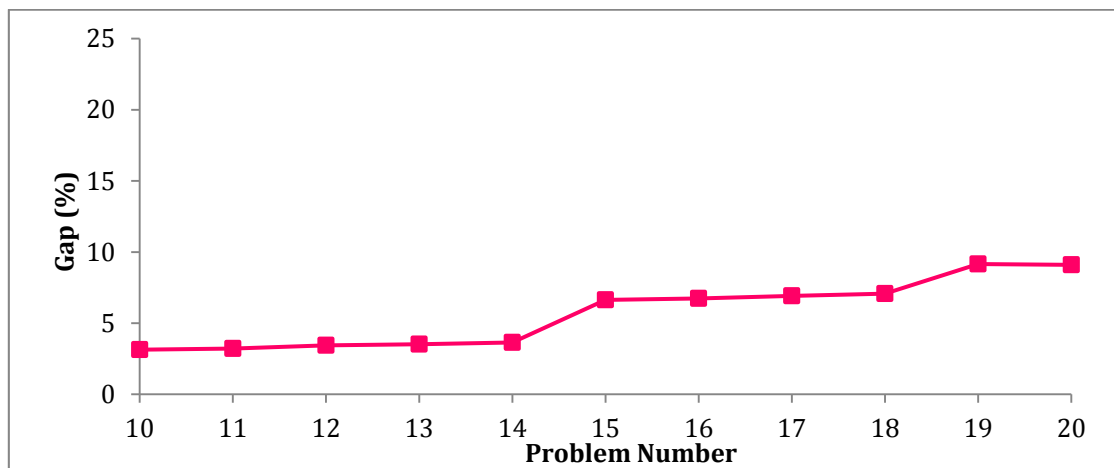
یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

جدول ۴. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم های فراابتکاری

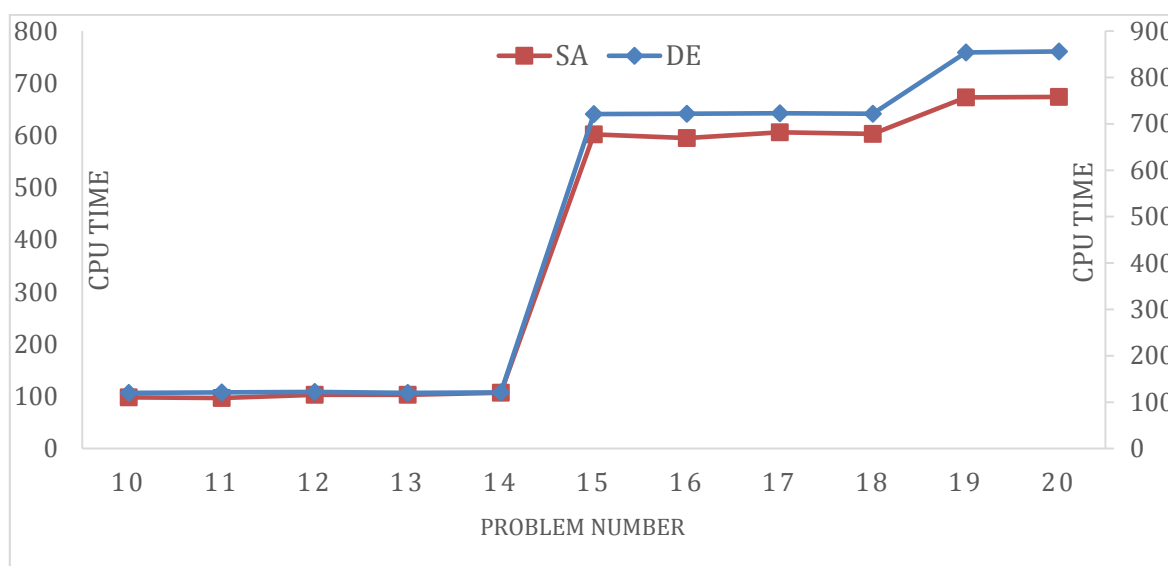
الگوریتم	پارامترها	مقدار تنظیم شده	پارامترها	مقدار تنظیم شده
شبیه سازی تبرید	$T_0$	۱۲	Mutation No.	۸
	$\alpha$	۰/۹۵	NFC	۴۰۰۰۰
تکامل تفاضلی	Population Size	۳۰۰	F	۰/۸
	Crossover Rate	۰/۳	NFC	۴۰۰۰۰



شکل ۲. فاصله الگوریتم های DE و SA با استفاده از نرم افزار GAMS



شکل ۳. فاصله الگوریتم شبیه سازی تبرید در مقایسه با الگوریتم تکامل تفاضلی



شکل ۴. زمان CPU الگوریتم های تکامل تفاضلی و شبیه سازی تبرید در سایز بزرگ

جدول ۵. میانگین درصد فاصله های نسبی و زمان CPU برای مساله های سایز کوچک

Data set	$i*j*v*d*t$	DE							SA						
		Replications					Gap	Time(s)	Replications					Gap	Time(s)
		۱	۲	۳	۴	۵			۱	۲	۳	۴	۵		
۱	۲#۲#۳#۲#۲#۶	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۰	۳۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۰	۲۶
۲	۳#۲#۳#۳#۲#۶	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱۰	۲۶
۳	۳#۴#۵#۳#۲#۸	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۰	۴۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۰	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۹۲	۳۲
۴	۴#۴#۷#۳#۳#۸	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۲	۴۹	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۵	۰,۱۲	۰,۱۳	۰,۱۳۰	۳۳
۵	۴#۵#۸#۴#۴#۸	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱۰	۴۹	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۱	۰,۲۹	۰/۳۰	۰,۲۷۰	۳۴
۶	۵#۵#۱۰#۴#۴#۸	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۴۰	۶۸	۱/۱	۱/۲	۱/۱	۱,۴۰	۱/۳	۱,۲۲	۴۵
۷	۵#۶#۱۲#۴#۴#۱۰	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۵۰	۶۶	۱/۲	۱/۴	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱,۴۰	۴۵
۸	۶#۷#۱۳#۵#۴#۱۰	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۶۵	۶۸	۱/۸	۲/۱	۲/۱	۱/۷	۱/۷	۱,۸۸	۴۴
۹	۶#۸#۱۴#۵#۴#۱۰	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۰۸۰	۶۸	۲/۳	۲/۰	۲/۱	۲/۲	۲/۲	۲,۱۶	۴۶

## یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

جدول ۶. میانگین درصد فاصله های نسبی و زمان CPU برای مساله های سایز بزرگ

Data set	i*j*v*d*t	DE	SA					Gap	Time	
			Time	Replications						
				۱	۲	۳	۴			۵
۱۰	۹#۱۰#۲۰#۷#۱۲	۱۲۰	۳/۱	۳/۲	۳/۱	۳/۳	۳/۰	۳/۱۴	۹۸	
۱۱	۱۰#۱۰#۲۴#۸#۱۲	۱۲۱	۳/۲	۳/۱	۳/۳	۳/۴	۳/۱	۳/۲۲	۹۷	
۱۲	۱۴#۱۰#۳۰#۸#۱۴	۱۲۲	۳/۳	۳/۴	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۴۴	۱۰۳	
۱۳	۱۷#۱۳#۳۶#۱۰#۱۴	۱۲۰	۳/۶	۳/۵	۳/۷	۳/۳	۳/۵	۳/۵۲	۱۰۳	
۱۴	۱۹#۱۳#۴۶#۱۲#۱۴	۱۲۱	۳/۶	۳/۷	۳/۶	۳/۶	۳/۷	۳/۶۴	۱۰۷	
۱۵	۲۱#۱۶#۵۰#۱۴#۱۸	۷۲۱	۶/۵	۶/۶	۶/۸	۶/۸	۶/۵	۶/۶۴	۶۰۲	
۱۶	۲۴#۱۶#۵۴#۱۶#۱۸	۷۲۲	۶/۷	۶/۵	۶/۷	۶/۹	۶/۹	۶/۷۴	۵۹۵	
۱۷	۲۴#۱۷#۶۰#۱۸#۱۸	۷۲۳	۶/۹	۶/۸	۷/۰	۷/۰	۶/۹	۶/۹۲	۶۰۶	
۱۸	۲۷#۲۰#۶۴#۱۹#۱۸	۷۲۲	۷/۱	۷/۱	۷/۲	۶/۹	۷/۱	۷/۰۸	۶۰۳	
۱۹	۲۷#۲۰#۷۰#۲۰#۲۰	۸۵۴	۹/۲	۹/۲	۹/۲	۹/۱	۹/۱	۹/۱۶	۶۷۳	
۲۰	۳۰#۲۷#۷۵#۲۰#۲۰	۸۵۶	۹/۱	۹/۲	۹/۱	۹/۱	۹/۰	۹/۱۰	۶۷۴	

### ۴-۵ آنالیز حساسیت

آنچه مدل ریاضی نشان می دهد شمایی از حل مسئله در شرایط شبیه سازی شده به واقعیت است . اما تاثیر مقادیر پارامترها در مدل در نظر گرفته نشده است. مدل دارای ۱۵ پارامتر است که از این بین پارامترهایی که برای تحلیل حساسیت انتخاب شده اند شامل تقاضای مشتریان، ظرفیت نفتکشها و ظرفیت کشتیهاست. در تحلیل حساسیت به غیر از پارامتر مورد بررسی بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می شوند و تاثیر هر یک از این پارامترها بر روی سه قسمت تابع هدف یعنی هزینه های حمل و نقل، هزینه های نگهداری موجودی و هزینه کمبود سنجیده می شود. برای تحلیل حساسیت مسئله ای با ۳ پورت مبدا، ۴ پورت مقصد، ۳ نفتکش و ۵ کشتی در نظر گرفته شده است .

### ➤ تاثیر پارامتر تقاضا

یکی از پارامترهایی که می تواند تاثیر گسترده ای بر سه قسمت تابع هدف داشته باشد، میزان تقاضای هر مشتری است که در این قسمت آن را مورد بررسی قرار می دهیم . همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده با افزایش تقاضای مشتری ملزم به استفاده از وسایل حمل و نقل بیشتری خواهیم بود در نتیجه هزینه کل حمل و نقل افزایش می یابد همچنین با افزایش تقاضا امکان مواجه شدن با کمبود بالارفته و تابع هزینه کمبود صعودی است و به تبع آن هزینه های نگهداری موجودی در پورت مقصد نیز متناسب با افزایش تقاضا روندی صعودی خواهد داشت.

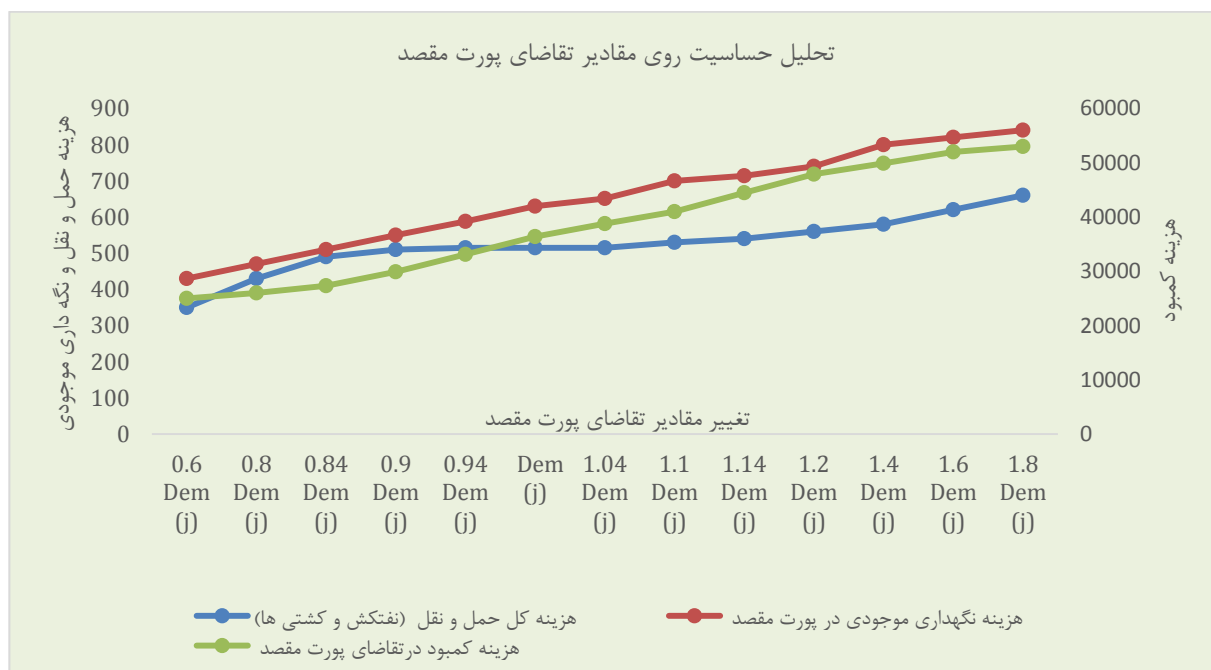
### ➤ تاثیر پارامتر ظرفیت نفتکش

در شکل (۶) به بررسی تاثیر ظرفیت نفتکش بر تابع هدف پرداخته شده است . همانطور که در شکل و جدول های داده شده مشاهده می شود میزان ظرفیت با فرض ثبات سایر متغیرها بین ۰/۶ تا ۱/۸ ظرفیت نفتکش اولیه تغییر داده شده است. در

➤ **تأثیر پارامتر ظرفیت کشتی**

در این بخش از تحلیل حساسیت به بررسی ظرفیت کشتی و تأثیر آن روی بخش های مختلف تابع هدف پرداخته شده است . پارامتر ظرفیت کشتی بین ۰/۶ تا ۱/۸ تغییر داده شده است . مشاهدات در شکل (۷) نشان می دهد که کاهش ظرفیت کشتی نسبت به حالت بهینه باعث افزایش هزینه های حمل و نقل می شود. از سوی دیگر افزایش یا کاهش ظرفیت کشتی به هزینه های موجودی و کمبود در مقصد بستگی ندارد در نتیجه این دو نمودار روند ثابتی را در طول تغییرات خواهند داشت.

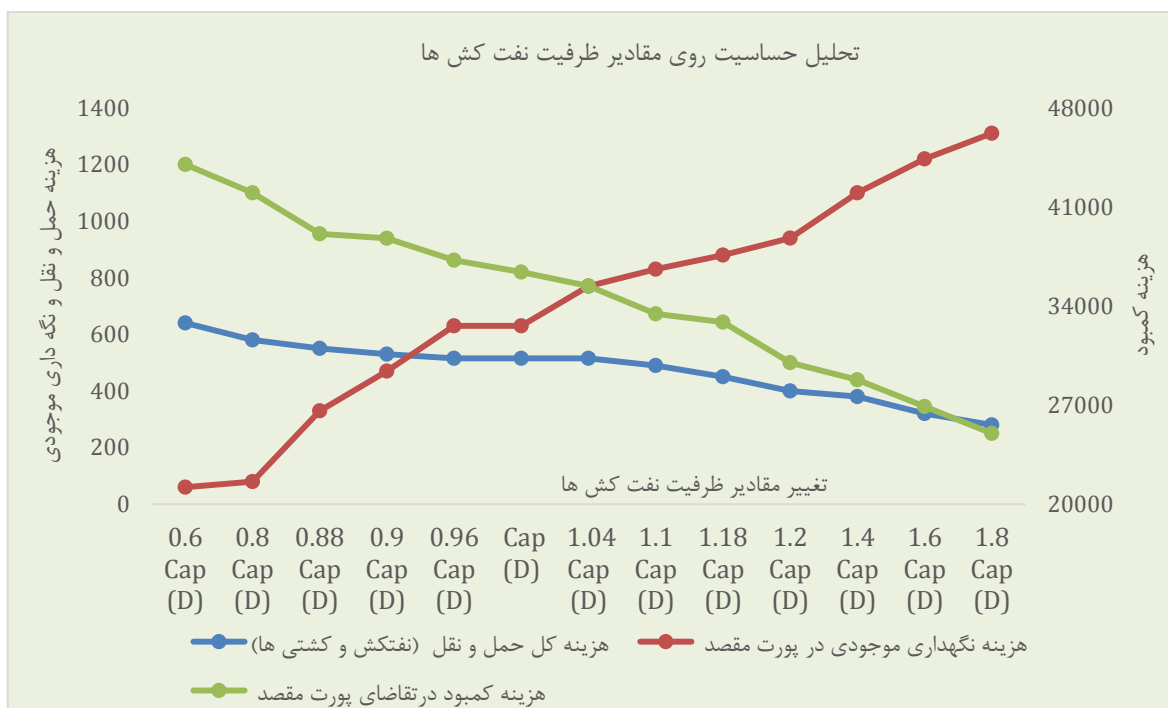
نمودار رسم شده با استفاده از داده های حل مسئله مشاهده می شود که استفاده از نفتکش هایی با ظرفیت بیشتر موجب تخلیه محموله های بیشتر در مقصد و در نتیجه افزایش هزینه های نگهداری موجودی خواهد شد و همین طور به علت کاهش استفاده در تعداد وسایل حمل و نقل موجب کاهش کل هزینه های حمل و نقل خواهد شد. در مورد هزینه های کمبود نیز همان طور که مشاهده می شود نمودار رسم شده نزولی است چون با افزایش ظرفیت نفت کش امکان پاسخ گویی بیشتر به تقاضای مشتریان وجود خواهد داشت پس در نتیجه هزینه های کمبود کاهش می یابد.



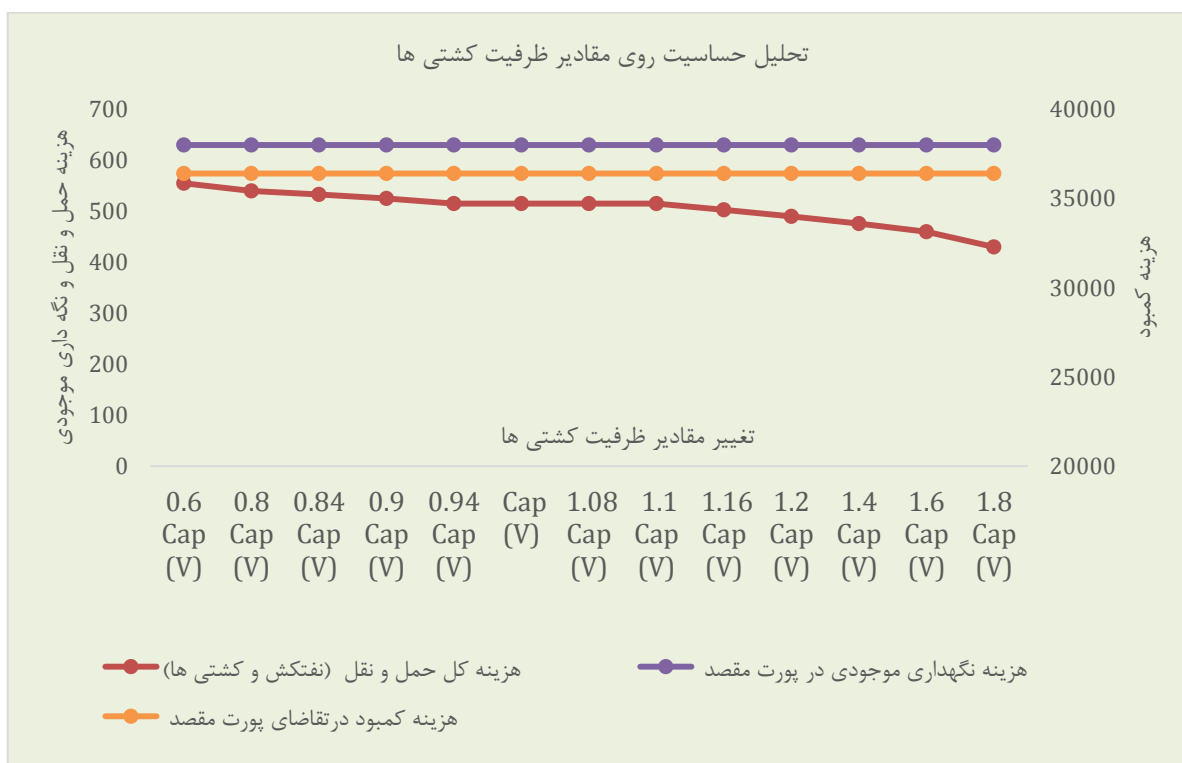
شکل ۵. تحلیل حساسیت روی مقادیر تقاضای پورت مقصد



یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....



شکل ۶. تحلیل حساسیت روی مقادیر ظرفیت نفت کش



شکل ۷. تحلیل حساسیت روی مقادیر ظرفیت کشتی ها

investments", Review of Financial Economics, Vol.18, No.1, pp.10-22.

-Agra, A., Christiansen, M., Delgado, A. and Hvattum, L. M. (2015) "A maritime inventory routing problem with stochastic sailing and port times", Computers & Operations Research, Vol. 61, pp. 18-30.

-Andersson, H. Marielle Christiansen, M. and Kjetil Fagerholt, K. "Transportation planning and inventory management in the LNG supply chain". Energy, natural resources and environmental economics. Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp.427-439..

-Arteconi, A. and Polonara, F. (2013) "LNG as vehicle fuel and the problem of supply: The Italian case study", Energy Policy, Vol. 62, pp.503-512.

-Berle, Ø., Norstad, I. and Asbjørnslett, B. E. (2013) "Optimization, risk assessment and resilience in LNG transportation systems", Supply Chain Management: An International Journal, Vol.18 , No. 3, pp.253-264.

-Bergey, P. K. and Ragsdale, C. (2005) "Modified differential evolution: a greedy random strategy for genetic recombination", Omega Journal (Elsevier), Vol. 33, No.3, pp.255-265.

-Bittante, A., Mikolajková, M., Saxe'n, H. and Waller, J. (2017) "Optimization of LNG and natural gas supply chains—two models", Proceedings of Automation Days, pp.23-24.

-Christiansen, M., Fagerholt, K. and Ronen, D. (2004) "Ship routing and scheduling: Status and perspectives", Transportation Science, Vol.38, No.1, pp.1-18.

## ۶. نتیجه گیری

از جمله مهم ترین مشکلات در زنجیره های تامین، نحوه برقراری ارتباط بهینه بین سطوح زنجیره و انتقال مواد بین آنها می باشد. استفاده از حمل و نقل دریایی و تعیین مسیر بهینه کشتی های باربری از متداول ترین روش های حمل و نقل مواد در زنجیره های تامین سوخت های فسیلی از جمله گاز طبیعی محسوب می گردد. بدین منظور چارچوب بهینه ای برای حمل و نقل گاز مورد نیاز در محل های مصرف از طریق ناوگان حمل و نقل دریایی ارائه خواهد شد. بنابراین در این پژوهش بر آن شدیم که قسمت حمل و نقل دریایی را بررسی کنیم در نتیجه یک مدل ریاضی زنجیره تامین سه سطحی شامل سطوح پورت مبدأ، نفتکش های میانی و پورت مقصد طراحی شد. به منظور طراحی مسیرهای بهینه در یک زنجیره تامین گاز مایع، یک سیستم برنامه ریزی حمل و نقل با در نظر گرفتن نفتکش های میانی برای حداکثر کردن کارایی زنجیره در نظر گرفته شد.

با توجه به سخت بودن حل مدل ریاضی، الگوریتم های فرا ابتکاری جهت حل مدل ارائه شده در نظر گرفته شدند. جهت کارایی الگوریتم های پیشنهادی، مساله را در سایز کوچک با جواب های نرم افزار GAMS مقایسه کردیم سپس در سایز بزرگ به مقایسه دو الگوریتم پرداخته شد و مشاهده شد که الگوریتم تکامل تفاضلی جوابهای بهتری در زمان معقولی به می دهد. مطالعه مسایل زنجیره تامین گاز مایع با در نظر رفتن شرایط زیست محیطی و در نظر گرفتن عدم قطعیت برای مدل از جمله مدل سازی فازی و بهینه سازی استوار می تواند یکی از مهم ترین جهت های مطالعاتی در این زمینه باشد.

## ۷. پی نوشتها

- 1- Simulated Annealing
- 2- Differential Evolution
- 3-Liquefied Natural Gas (LNG)

## ۸. مراجع

-Abadie, L. M. and Chamorro, J. M. (2009) "Monte Carlo valuation of natural gas

- Jokinen, R., Pettersson, F. and Saxén, H. (2015) "An MILP model for optimization of a small-scale LNG supply chain along a coastline", *Applied Energy*, Vol.138, No. 423-431.
- Kaplan, M., Wentworth, R. C. and Hischer, R. J. (1972) "Simulation and optimization of LNG shipping systems", Vol.72, pp.45-64.
- Kim, J., Seo, Y. and Chang, D. (2016) "Economic evaluation of a new small-scale LNG supply chain using liquid nitrogen for natural-gas liquefaction", *Applied Energy*, Vol.182, pp.154-163.
- Koenigsberg, E. and Lam, R. C. (1976) "Cyclic queue models of fleet operations", *Operations Research*, Vol. 24, No. 3, pp.516-529.
- Koenigsberg, E. and Meyers, D. A. (1980) "An interacting cyclic queue model of fleet operations", *Logistics and Transportation Review*, Vol.16, No.1, pp.59-71.
- Lai, G., Wang, M. X., Kekre, S., Scheller-Wolf, A. and Secomandi, N. (2010) "Valuation of the Real Option to Store Liquefied Natural Gas at a Regasification Terminal", *Tepper School of Business*.
- Mohammadi, M., Jula, P. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017). "Design of a reliable multi-modal multi-commodity model for hazardous materials transportation under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol.257, No.3, pp.792-809.
- Norstad, I., Fagerholt, K. and Laporte, G. (2011) "Tramp ship routing and scheduling with speed optimization", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No. 5, pp.853-865.
- Özelkan, E. C., D'Ambrosio, A. and Teng, S. G. (2008) "Optimizing liquefied natural gas terminal design for effective supply-chain operations", *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, No. 2, pp.529-542.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. and Ronen, D. (2013) "Ship routing and scheduling in the new millennium", *European Journal of Operational Research*, Vol.228, No.3, pp.467-483.
- Durrer, E. J. and Slater, G. E. (1977) "Optimization of petroleum and natural gas production—a survey", *Management Science*, Vol. 24, No.1, pp.35-43.
- Elia, J. A., Li, J. and Floudas, C. A. (2015) "Strategic planning optimization for natural gas to liquid transportation fuel (GTL) systems", *Computers & Chemical Engineering*, Vol.72, pp.109-125.
- Fodstad, M., Uggem, K. T., Rømo, F., Lium, A. G., Stremersch, G. and Hecq, S. (2010) "LNGScheduler: a rich model for coordinating vessel routing, inventories and trade in the liquefied natural gas supply chain", *The Journal of Energy Markets*, Vol.3, No. 4, p.31.
- Geman, H. (2005) "Commodities and commodity derivatives", *Modeling and Pricing for Agriculturals, Metals and Energy*, Chichester (Grande-Bretagne) ": Wiley Finance.
- Grønhaug, R. and Christiansen, M. (2009) "Supply chain optimization for the liquefied natural gas business", In *Innovations in Distribution Logistics* . Springer Berlin Heidelberg. pp. 195-218.
- Grønhaug, R., Christiansen, M., Desaulniers, G. and Desrosiers, J. (2010) "A branch-and-price method for a liquefied natural gas inventory Routing problem", *Transportation Science*, Vol. 44, No.3, pp.400-415.
- Halvorsen-Weare, E. E. and Fagerholt, K. (2013) "Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints", *Annals of Operations Research*, pp.1-20.

- Simchi-Levi, D., Simchi-Levi, E. and Kaminsky, P. (1999) "Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and cases", New York: McGraw-Hill.
- Stålhane, M., Rakke, J. G., Moe, C. R., Andersson, H., Christiansen, M. and Fagerholt, K. (2012) "A construction and improvement heuristic for a liquefied natural gas inventory routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, No.1, pp.245-255.
- Tusiani, M. D. and Shearer, G. (2007) "LNG: a nontechnical guide", PennWell Books.
- Varadharajan, T. K. and Rajendran, C. (2005) "A multi-objective simulated-annealing algorithm for scheduling in flowshops to minimize the makespan and total flowtime of jobs". *European Journal of Operational Research*, Vol.167, No.3, pp. 772-795.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B. and Mohammadi, M. (2016) "Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.89, pp.182-214.
- Rodríguez, R. Y. (2008) "Real option valuation of free destination in long-term liquefied natural gas supplies", *Energy Economics*, Vol. 30, No. 4, pp. 1909-1932.
- Ronen, D. (1983) "Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 12, No. 2, pp.119-126.
- Ronen, D. (1993) "Ship scheduling: The last decade, *European Journal of Operational Research*, Vol. 71, No.3, pp.325-333.
- Shahidehpour, M. and Marwali, M. (2012) "Maintenance scheduling in restructured power systems, Springer Science & Business Media.
- Li, Z. (2005) "Natural gas for generation: a solution or a problem?", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 3, No. 4, pp.16-21.
- Shao, Y., Furman, K. C., Goel, V. and Hoda, S. (2015) "A hybrid heuristic strategy for liquefied natural gas inventory routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 53, pp.151-171.

## یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع .....

زهرا توکلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه سراسری الزهراء تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نهران جنوب اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی ریاضی در حوزه حمل و نقل است.



علیرضا رشیدی کمیجان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نهران جنوب و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۷۸ را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نهران جنوب اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علوم و تحقیقات تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی ریاضی در حوزه های حمل و نقل و تولید بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزکوه است.

