ارائه مدل حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای، چند محصولی، دوسطحی و حل آن با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

حسنی ملانوری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

رضا توکلی مقدم (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

فاطمه صبوحی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مصطفی حاجی آقائی کشتلی، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۰۹/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲

چکیده:

در دنیای واقعی معمولا علاوه بر هزینه متغیر حمل و نقل که وابسته به مقدار حمل‌شده است، هزینه ثابت دیگری برای استفاده از هر مسیر وجود دارد. این مسأله به عنوان حمل و نقل هزینه ثابت (FCTP)، یک مسأله برنامه‌ریزی است که در صنعت و تجارت به صورت عملی مورد توجه شایانی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر نوع خاصی از هزینه ثابت، به صورت پله‌ای معرفی شده است که در این زمینه مطالعات محدودی صورت گرفته است که صرفا شامل مسائل تک سطحی، با یک محصول و یک نوع وسیله نقلیه است. در این مقاله حمل و نقل هزینه ثابت به صورت پله‌ای دوسطحی، برای چند محصول، چند نوع وسیله نقلیه (مسأله solid) و با در نظرگیری محدودیت ظرفیت روی مسیر و وسایل نقلیه مدل‌سازی و حل شده است. با توجه به NP-hard بودن مسأله، برای حل مدل، الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده شده است. جهت ارزیابی کارایی این الگوریتم، نتایج حل آن با نتایج حل دقیق به دست آمده از حل نرم افزار GAMS مقایسه گردیده و نتایج نشان می‌دهد الگوریتم SA جواب‌های نسبتا خوبی در مدت زمان مناسب ارائه می‌دهد.

واژه های کلیدی: حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای، زنجیره تأمین دوسطحی، شبیه‌سازی تبرید، solid.

۱. مقدمه

مسأله حمل و نقل هزینه ثابت[۱] توسعه‌ای از مسأله عمومی حمل و نقل است که در آن تعدادی از یک محصول برای ارضای تقاضا به محل‌های تقاضا حمل می‌شود در حالی که هزینه ثابتی علاوه بر هزینه متغیر قبلی اعمال می‌شود. در عمل بسیاری از مسائل توزیع و حمل و نقل را می‌توان به عنوان مسائل حمل و نقل هزینه ثابت فرموله کرد. همچنین مسأله هزینه ثابت در بسیاری از مسائل زمان‌بندی، مکان‌یابی، تخصیص وسایل نقلیه، مدیریت پسماندهای جامد و غیره کاربرد دارد. این مسأله در عمل به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی، بازرگانی و تجاری استفاده شده است و همزمان به صورت گسترده‌ای از لحاظ تئوری گسترش یافته است. انواع مختلفی از مسائل حمل و نقل هزینه ثابت مورد مطالعه قرار گرفته است. این مسأله با توجه به نوع هزینه متغیر می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد. همچنین مسأله از نظر مقادیر تقاضا و عرضه می‌تواند متوازن یا غیر متوازن باشد که حالت غیرمتوازن به سادگی قابل تبدیل به حالت متوازن است.

برای اولین بار، بالینسکی [Balinski, 1961] مسأله حمل و نقل هزینه ثابت را فرمول‌بندی کرده، ویژگی‌های خاص آن را ارائه داده و برای حل آن روش تقریبی پیشنهاد کرد. همچنین جهت مقایسه، حل مدل سنتی حمل و نقل را در کنار حل مدل جدید با هزینه ثابت انجام داد. یکی از محدودیت‌هایی که در مسأله حمل و نقل می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، محدودیت ظرفیت روی مسیر حمل[۲] است. تاینگان، کوردیو و گندرون [Thiongane, Cordeau and Gendron, 2015] مسأله حمل و نقل هزینه ثابت را برای چند محصول و با محدودیت ظرفیت مورد بررسی قرار دادند. همچنین پرامنیک و همکاران [Pramanic et al. 2015]، مسأله حمل و نقل هزینه ثابت دو سطحی را در شرایط عدم قطعیت از نوع فازی و با محدودیت ظرفیت مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله حداکثر کردن سود به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

در بعضی مسائل حمل و نقل هزینه ثابت، حمل چند نوع کالا[۳] مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای نمونه می‌توان به مقاله گیری و همکاران [Giri et al. 2015] اشاره کرد که مسأله حمل و نقل هزینه ثابت چند کالایی را در شرایط عدم قطعیت فازی و برای مسأله solid مورد بررسی قرار دادند. در مسأله حمل و نقل solid، نوع وسیله نقلیه برای حمل کالا نیز درنظر گرفته می‌شود. در مسأله solid علاوه بر محدودیت‌های عرضه و تقاضا، محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه نیز وجود دارد.

بعضی از مطالعات، دوسطح[۴] را برای حمل کالا در نظر گرفته‌اند. سطح اول شامل حمل محصولات از نقاط منبع (کارخانه، تولیدکننده و غیره) به مراکز توزیع (عمده فروش و غیره) و سطح دوم شامل حمل محصولات از مراکز توزیع به نقاط تقاضا (مشتری، خرده فروش و غیره) است. پینتی و پاپ [Pintea and Pop, 2015] نیز مسأله حمل و نقل هزینه ثابت دوسطحی با محدودیت ظرفیت را مورد بررسی قرار داده و از یک الگوریتم هیبرید توسعه یافته برای حل این مسأله بهره جسته است.

برای حل مسأله حمل و نقل هزینه ثابت، تاکنون الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی توسعه یافته است. از جمله می‌توان به مانیماران و سلادورای [Manimaran and Selladurai, 2013] اشاره کرد که برای حل مسأله توزیع با حمل و نقل هزینه ثابت، الگوریتم ازدحام گربه‌ها[۵] را ارائه دادند. آنها برای نمایش کارایی الگوریتم ازدحام گربه‌های ارائه شده، نتایج حل را با نتایج الگوریتم ژنتیک مبتنی بر درخت پوشایی که توسط جو، لی و جن [Jo, Li and Gen., 2007] ارائه شده بود، مقایسه کردند. کنان و گویندان و سلیمانی [Kannan, Govindan and Soleimani., 2014]، برای حل مسأله توزیع دوسطحی شامل حمل و نقل هزینه ثابت، سیستم ایمنی مصنوعی[۶] و الگوریتم گله گوسفندان[۷] را اعمال کردند و با حل نمونه‌هایی با ابعاد بزرگ، عملکرد دو الگوریتم ارائه شده را مقایسه کردند. طبق نتایج آن‌ها اعلام کردند که الگوریتم گوسفندان پیشنهادی، بهتر از سیستم ایمنی مصنوعی عمل می‌کند؛ همچنین الشربینی و الحملی [El-Sherbiny and Alhamali, 2013]، یک الگوریتم انبوه ذرات هیبرید[۸] با سیستم ایمنی مصنوعی را روی مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پیاده‌سازی کردند. در این الگوریتم به جای استفاده از عدد پروفر و درخت پوشای بکار رفته در الگوریتم ژنتیک، از فرآیندهای تخصیص و کدگذاری استفاده شده است. این الگوریتم جواب‌های شدنی تولید می‌کند و برای حل هردو نوع مسأله متوازن و نامتوازن مناسب است. آنها با مقایسه نتایج حاصل از حل مسأله با این الگوریتم، با نتایج الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط حاجی‌آقائی کشتلی و ملاعلیزاده زواردهی و توکلی مقدم [Hajiaghaei Keshteli, Molla-Alizadeh-Zavardehiand Tavakkoli-Moghaddam, 2010]، بیان

کردند الگوریتم جدید جوابی بهتر و یا حداقل مساوی آن‌ها ارائه می‌دهد.

کوالسکی و لو [Kowalski and Lev, 2008] حالت خاصی از مسأله FCTP را در نظر گرفتند که در آن هزینه ثابت تابعی پله‌ای دارد و وابسته به مقدار بار حمل‌شونده در هر مسیر است. در مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای[9]، تابع هدف نیز پله‌ای است. این مسأله که اولین بار توسط سندراک [Sandrock, 1988] مطرح شده، از نوع NP-super hard بوده و از درجه پیچیدگی بالاتری برخوردار است. الشربینی [El-Sherbiny, 2012] نیز مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای را مورد تحقیق قرار داده و برای حل این مسأله الگوریتم ایمنی مصنوعی مبتنی بر جهش تعویض را ارائه دادند. آن‌ها مجموعه‌ای از توابع جهش را پیشنهاد داده و از بین آن‌ها بهترین را از نظر عملکرد تعیین کرده‌اند. این الگوریتم بدون در نظر گرفتن مشتری یا تأمین‌کننده مجازی، قادر به حل هردو نوع مسأله متوازن و غیر متوازن است. برخلاف الگوریتم کوالسکی و لو [Kowalski and Lev, 2008]، الگوریتم الشربینی برای حل مسأله با ابعاد بزرگ مناسب است.

کومار [kumar, 2014]، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای توسعه داد. در این مقاله مدل در مسائل عددی کوچک به کار گرفته شده و پیچیدگی بالای مسأله نشان داده شده است. ملاعلیزاده، محمودی‌راد و رحیمیان [Molla-Alizadeh, Mahmoodirad and Rahimian., 2014] نیز مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای را بررسی کرده و دو الگوریتم ژنتیک و ممتیک[10] مبتنی بر درخت پوشا را برای این مسأله توسعه داده و مقایسه کردند.

با بررسی مطالعات گذشته شکاف‌های زیر در ادبیات مربوط به حمل و نقل هزینه ثابت مشاهده می‌شود:

۱. در مقالات موجود در زمینه حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای فقط حمل یک نوع محصول بررسی شده است.
۲. در اینگونه مطالعات، حمل و نقل solid، یا به عبارتی دیگر نوع وسیله نقلیه لحاظ نشده است.
۳. مقالات موجود همه تک سطحی می‌باشند.
٤. محدودیت ظرفیت در مطالعات موجود لحاظ نشده است.

در این مطالعه به ارائه و حل مدل حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای دو سطحی با در نظر گرفتن نوع وسیله نقلیه و نوع محصول حمل شده می‌پردازیم که محدودیت‌های ظرفیت روی مسیرهای حرکت نیز در آن در نظر گرفته شده‌است.

در ادامه ساختار مقاله به این صورت خواهد بود: در بخش دوم به تشریح مسأله مورد بررسی و در بخش سوم به مدل‌سازی ریاضی مسأله می‌پردازیم. در بخش چهارم روش حل ارائه خواهد شد. بخش پنجم شامل نتایج و بخش ششم شامل نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی است.

۲. تشریح مسأله

در این قسمت، به ارائه مدل حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای دو سطحی با در نظر گرفتن نوع وسیله نقلیه و نوع محصول حمل شده می‌پردازیم که محدودیت‌های ظرفیت روی مسیرهای حرکت نیز در آن در نظر گرفته شده‌است. مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای یک شکل تغییر یافته از مسأله حمل و نقل هزینه ثابت است که با فعال کردن یک مسیر، علاوه بر هزینه متغیر یک هزینه ثابت نیز متحمل می‌شود، این هزینه ثابت به صورت یک تابع پله‌ای تعریف می‌شود و تابع هدف را با یک ساختار پله‌ای مواجه می‌کند، بدین صورت که در صورت حمل بیش از مقدار خاصی از کالا یک هزینه ثابت اضافی به هزینه ثابت قبلی اضافه می‌گردد.

شبکه مورد بررسی دارای سه جزء است، جزء اول نقاط منابع (تولید کنندگان، تأمین کنندگان و ...) می‌باشند. جزء دوم مراکز توزیع (عمده فروشان، انبار و هرگونه مراکز توزیع) هستند و جزء سوم نقاط مقصد یا نقاط نهایی هستند که کالاها در نهایت به این نقاط حمل شده و مورد مصرف قرار می‌گیرند؛ در نتیجه مسأله به صورت دوسطحی مدل‌سازی شده است.

در این مطالعه این مفروضات در نظر گرفته شده‌اند:

- میزان منابع در دسترس، تقاضا، تعداد نقاط منابع، مراکز توزیع و تقاضا، هزینه‌ها مشخص و ورودی مسأله است.
- ظرفیت وسایل نقلیه، ظرفیت مراکز توزیع و ظرفیت مسیرهای حمل و نقل معلوم است.
- محدودیتی برای بودجه نداریم.
- کمبود کالا وجود ندارد و تمامی تقاضاها برآورده می‌شود.

- ارتباطی بین نقاط منابع وجود ندارد. این فرض در مورد نقاط میانی و نقاط تقاضا نیز صادق است.
- بین نقاط منابع و تقاضا ارتباط مستقیم وجود ندارد.
- حمل چند نوع محصول به واسطه بسته‌بندی ایمن باهم اختلالی ندارد.
- ظرفیت هر مرکز توزیع حداقل برابر جمع کل تقاضا است.

مدل ارائه شده الهامی از مدل بالاجی و جواهر [Balaji and Jawahar, 2010] است و به توسعه آن می‌پردازد.

۳. مدل ریاضی مسأله

در این بخش مدل ریاضی مسأله تشریح شده آورده شده است.

۳-۱ مجموعه‌ها و اندیس‌ها

I	مجموعه نقاط منابع	$i \in \{1,2,...,I\}$
J	مجموعه نقاط مراکز توزیع	$j \in \{1,2,...,J\}$
K	مجموعه نقاط تقاضا	$k \in \{1,2,...,K\}$
L	مجموعه وسایل نقلیه	$l \in \{1,2,...,L\}$
P	مجموعه اقلام قابل حمل	$p \in \{1,2,...,P\}$

۳-۲ پارامترها

d_{kp}	تقاضای مقصد k برای کالای p
s_{ip}	میزان کالای p موجود در نقطه i
cap_l	ظرفیت حمل وسیله نقلیه l
r_{ijl}	ظرفیت حمل و نقل روی کمان (i,j) با وسیله نقلیه l
$\bar{r}_{jkl}$	ظرفیت حمل و نقل روی کمان (j,k) با وسیله نقلیه l
c_{ijlp}	هزینه حمل و نقل هر واحد کالای p از منبع i به مرکز توزیع j با وسیله نقلیه l
$\bar{c}_{jklp}$	هزینه حمل و نقل هر واحد کالای p از مرکز توزیع j به مقصد k با وسیله نقلیه l
$f_{ijl,1}$	هزینه ثابت حمل زیر A_{ijl} واحد کالا از منبع i به مرکز توزیع j با وسیله نقلیه l
$f_{jkl,1}$	هزینه ثابت حمل زیر $\bar{A}_{jkl}$ واحد کالا از مرکز توزیع j به مقصد k با وسیله نقلیه l
$f_{ijl,2}$	هزینه ثابت حمل بیش از A_{ijl} واحد کالا از منبع i به مرکز توزیع j با وسیله نقلیه l
$f_{jkl,2}$	هزینه ثابت حمل بیش از $\bar{A}_{jkl}$ واحد کالا از مرکز j به مقصد k با وسیله نقلیه l
A_{ijl}	در صورت حمل کالا بیشتر از این مقدار در سطح اول هزینه ثابت اضافی $f_{ijl,2}$ اعمال می‌شود.
$\bar{A}_{jkl}$	در صورت حمل کالا بیشتر از این مقدار در سطح دوم هزینه ثابت اضافی $f_{jkl,2}$ اعمال می‌شود.

۳-۳ متغیرهای تصمیم‌گیری

x_{ijlp}	مقدار کالای نوع p که از منبع i به مرکز j که با وسیله نقلیه l حمل می‌شود.
$\bar{x}_{jklp}$	مقدار کالای نوع p که از مرکز توزیع j به مقصد k با وسیله نقلیه l حمل می‌شود.
$y_{ijl,1}$	۱ در صورتیکه $\sum_{p=1}^{P} x_{ijlp} > 0$ و در غیر این صورت برابر ۰ است.
$y_{ijl,2}$	۱ در صورتیکه $\sum_{p=1}^{P} x_{ijlp} \ge A_{ijl}$ و در غیر این صورت برابر ۰ است.
$y_{jkl,1}$	۱ در صورتیکه $\sum_{p=1}^{P} \bar{x}_{jklp} > 0$ و در غیر این صورت برابر ۰ است.
$y_{jkl,2}$	۱ در صورتیکه $\sum_{p=1}^{P} \bar{x}_{jklp} \ge \bar{A}_{jkl}$ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

۳-٤ مدل ریاضی

با توجه به شکاف‌های بررسی شده در ادبیات موضوع، در این بخش به ارائه یک مدل جدید در زمینه حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای پرداخته شده است که سعی شده شکاف‌های موجود پوشش داده شود و مسأله با شرایط دنیای واقعی سازگاری بیشتری داشته باشد. مدل ریاضی پیشنهادی مسأله حمل و نقل هزینه ثابت دوسطحی پله‌ای، چند کالایی و solid با محدودیت ظرفیت روی مسیرها و وسایل نقلیه، به شکل روابط (۱) الی (۱۰) است.

$$
\begin{aligned}
\text{Min } f_1 = & \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{p=1}^{P}\left\{c_{ijlp}x_{ijlp}\right\}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\left\{f_{ijl,1}\,y_{ijl,1}\right\}+\\
& \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\left\{f_{ijl,2}\,y_{ijl,2}\right\}+\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{p=1}^{P}\left\{\bar{c}_{jklp}\bar{x}_{jklp}\right\}\\
& +\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\left\{f_{jkl,1}\,y_{jkl,1}+f_{jkl,2}\,y_{jkl,2}\right\}
\end{aligned}
$$

s.t.

$$
\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}x_{ijlp}\le s_{ip} && \forall i\in I,p\in P\\
& \sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\bar{x}_{jklp}=d_{kp} && \forall k\in K,p\in P\\
& \sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L}x_{ijlp}=\sum_{k=1}^{K}\sum_{l}^{L}\bar{x}_{jklp} && \forall j\in J,p\in P \qquad (۹)\\
& \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}x_{ijlp}\le cap_l && \forall l\\
& \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}\bar{x}_{jklp}\le cap_l && \forall l\\
& x_{ijlp}\ge 0 && \forall i\in I,j\in J,l\in L,p\in P\\
& \bar{x}_{jklp}\ge 0 && \forall j\in J,\mathrm{k}\in K,l\in L,p\in P
\end{aligned}
$$

در مدل فوق رابطه (۱) تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل کمینه کردن هزینه‌ها اعم از هزینه‌های متغیر و ثابت است. برای هر کدام از دو سطح سه نوع هزینه وجود دارد که متشکل از هزینه متغیر حمل وابسته به مقدار حمل شونده و هزینه ثابت ناشی از استفاده از مسیر و هزینه ثابت اضافی است. رابطه (۲) محدودیت مربوط به میزان منابع در دسترس را نشان می‌دهد، طبق این محدودیت مقدار کالای حمل شده از هر کدام از منابع، نباید از میزان حداکثر آن منبع فراتر رود. رابطه (۳) تضمینی برای ارضای کل تقاضا است. میزان کالای حمل شونده در سطح دوم به هریک از نقاط مقصد برابر با میزان تقاضا در آن نقطه است. رابطه (٤) تعادل مواد را بیان می‌کند. این محدودیت نشانگر برابر بودن مقدار کل کالای حمل شده از منابع به مراکز توزیع با کل مقدار حمل شده از مراکز توزیع به نقاط تقاضا است. روابط (٥) و (٦) محدودیت مربوط به وسیله نقلیه را نشان می‌دهد، این روابط تضمین می‌کند که مقدار کالای حمل شده در هر وسیله نقلیه از ظرفیت آن وسیله بیشتر نشود. در نهایت روابط (۷) و (۸) نامنفی بودن متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

با توجه به وجود متغیرهای باینری در مدل مجموعه روابط (۹) برای ارتباط بین متغیرهای باینری و متغیرهای عدد صحیح تعریف می‌شود:

$$
\begin{aligned}
& \sum_{p=1}^{P}x_{ijlp}\le r_{ijl}*y_{ijl,1} && \forall i\in I,j\in J,l\in L\\
& \sum_{p=1}^{P}\bar{x}_{jklp}\le \bar{r}_{jkl}*y_{jkl,1} && \forall j\in J,\mathrm{k}\in K,l\in L\\
& \sum_{p=1}^{P}x_{ijlp}\le r_{ijl}*y_{ijl,2}+\mathrm{A}_{ijl}-1 && \forall i\in I,j\in J,l\in L\\
& \sum_{p=1}^{P}\bar{x}_{jklp}\le \bar{r}_{jkl}*y_{jkl,2}+\bar{\mathrm{A}}_{jkl}-1 && \forall j\in J,\mathrm{k}\in K,l\in L\\
& \sum_{p=1}^{P}x_{ijlp}\ge \mathrm{A}_{ijl}*y_{ijl,2} && \forall i\in I,j\in J,l\in L\\
& \sum_{p=1}^{P}\bar{x}_{jklp}\ge \bar{\mathrm{A}}_{jkl}*y_{jkl,2} && \forall j\in J,\mathrm{k}\in K,l\in L
\end{aligned}
$$

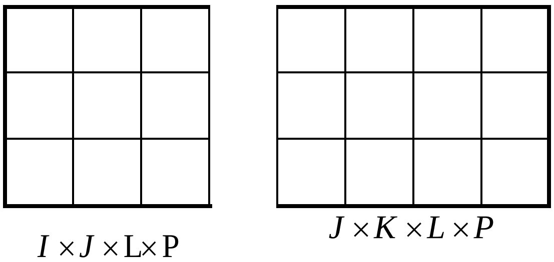
٤. روش حل

٤-۱ شبیه‌سازی تبرید

با توجه به NP-hard بودن مسأله مورد بررسی، برای حل ابعاد بزرگ به یک الگوریتم فراابتکاری نیاز است. برای این منظور الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل پیشنهادی، توسعه یافته است که مراحل مختلف آن در ادامه توضیح داده شده است. از جمله مزایای الگوریتم شبیه سازی تبرید میتوان به انعطاف پذیری بالا، پیدا کردن جواب‌های قابل قبول به دلیل تمرکز بر جست و جوی محلی و نیفتادن در دام بهینه محلی به دلیل وجود احتمال پذیرش پاسخ‌های غیر بهینه اشاره کرد [Busetti, 2003].

- **نمایش جواب اولیه**

نحوه نمایش جواب به طور مستقیم روی کارایی یک الگوریتم و کیفیت جواب‌های خروجی تأثیر می‌گذارد. نمایش جواب باید به نحوی باشد که با سهولت و به طور وسیع فضای جواب قابل جستجو باشد. در این تحقیق نمایش جواب به صورت دو ماتریس نشان داده می‌شود. این ماتریس‌ها بیانگر میزان کالای حمل شده، نوع کالای حمل شده و وسیله نقلیه مورد استفاده در هریک از مسیرهای حرکت است. ماتریس اول و دوم به ترتیب موارد بیان شده را برای سطح اول شبکه (از نقاط منابع به مراکز توزیع) و سطح دوم شبکه (از مراکز توزیع به نقاط تقاضا) نمایش می‌دهند. نحوه نمایش جواب در این الگوریتم به صورت شکل ۱ خواهد بود، که در آن $I\times J\times L\times P$ مقدار جا به جایی کالای نوع P توسط وسیله نقلیه L از لایه اول به دوم و $J\times K\times L\times P$ مقدار جا به جایی کالای نوع P توسط وسیله نقلیه L از لایه دوم به سوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه نمایش جواب

- **محاسبه هزینه معادل**

از رویکرد [Altasan, El-Sherbiny and Sasidhar, 2013]، با اندکی تغییر، جهت معادل‌سازی هزینه‌ها در مسأله حمل و نقل هزینه ثابت solid و پله‌ای، برای حمل چند نوع کالا استفاده شده است. طبق این رویکرد با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱٦) هزینه‌های ثابت و متغیر به یک هزینه معادل تبدیل می‌شوند تا یک تقریب خطی از مسأله به دست آید. از این هزینه معادل در یافتن جواب اولیه استفاده خواهد شد.

$$Aj=\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}d_{kp} \qquad (۱۰)$$

$$ss_i=\sum_{p=1}^{P}s_{ip} \qquad (۱۱)$$

برای هر مسیر بین منابع و مراکز توزیع و برای هر وسیله نقلیه نوع l داریم:

$$M_{ijl}=\min\{Aj,\ ss_i,\ r_{ijl},\ cap_l\} \qquad (۱۲)$$

با استفاده از رابطه (۱۲) هزینه معادل به صورت زیر به دست می‌آید.

$$CF_{ijl}=\begin{cases} f_{ijl,1}/M_{ijl}+c_{ijl} & if\ \ Aijl\ge M_{ijl} \\ (f_{ijl,1}+f_{ijl,2})/M_{ijl}+c_{ijl} & if\ \ Aijl< M_{ijl}\end{cases} \qquad (۱۳)$$

برای هر مسیر بین مراکز توزیع و نقاط تقاضا و برای هر وسیله نقلیه نوع l مقدار M_{jkl} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$dd_k=\sum_{p=1}^{P}d_{kp} \qquad (۱٤)$$

$$M_{jkl}=\min\{dd_k,r_{jkl},cap\} \qquad (۱۵)$$

با استفاده از مقدار M_{jkl} به دست آمده در رابطه (۱۵)، هزینه معادل بین مراکز توزیع و نقاط تقاضا برای هر وسیله نقلیه به صورت رابطه (۱٦) به دست می‌آید:

$$CF_{jkl}=\begin{cases} f_{jkl,1}/M_{jkl}+c_{jkl} & if\ \ \bar{A}_{jkl}\ge M_{jkl} \\ (f_{jkl,1}+f_{jkl,2})/M_{jkl}+c_{jkl} & if\ \ \bar{A}_{jkl}< M_{jkl}\end{cases} \qquad (۱٦)$$

جدول ۱، ماتریس هزینه معادل را در دو سطح مورد بررسی نشان می‌دهد. B یک عدد بسیار بزرگ است.

جدول ۱. ماتریس هزینه معادل

		مراکز توزیع				نقاط تقاضا				
		1	2	j	J	1	2	k	K	
منبع	1	CF_{11}	CF_{12}	CF_{1j}	CF_{1J}	B	B	B	B	S_1
	2	CF_{21}	CF_{22}	CF_{2j}	CF_{2J}	B	B	B	B	S_2
	i	CF_{i1}	CF_{i2}	CF_{ij}	CF_{iJ}	B	B	B	B	S_i
	I	CF_{I1}	CF_{I2}	CF_{Ij}	CF_{IJ}	B	B	B	B	S_I
مراکز توزیع	1	0	B	B	B	CF_{11}	CF_{12}	CF_{1k}	CF_{1K}	A_1
	2	B	0	B	B	CF_{21}	CF_{22}	CF_{2k}	CF_{2K}	A_2
	j	B	B	0	B	CF_{j1}	CF_{j2}	CF_{jk}	CF_{jK}	A_j
	J	B	B	B	0	CF_{J1}	CF_{J2}	CF_{Jk}	CF_{JK}	A_J
تقاضا		$A_1=\sum D_k$	$\sum D_k$	$\sum D_k$	$\sum D_k$	D_1	D_2	D_k	D_K	

- **تولید جواب‌های اولیه**

برای تولید جواب‌های اولیه، از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است. این الگوریتم، از الگوریتم توسعه داده شده در مقاله [Balaji and Jawahar, 2010]، الهام گرفته شده است. گام‌های این الگوریتم در ادامه شرح داده شده است.

- گام اول: ابتدا با استفاده از ماتریس هزینه متغیر معادل CF_{jkl} مقادیر $\bar{x}_{jklp}$ را تخصیص می‌دهیم. بدین صورت که کوچکترین عنصر ماتریس CF_{jkl} را مشخص کرده و این عنصر را در نظر می‌گیریم؛ در ادامه مقدار تقاضا، مقدار ظرفیت وسیله نقلیه و مقدار ظرفیت مسیر مربوط به این عنصر را مشخص می‌کنیم و بین این مقادیر کمترین آن‌ها را به $\bar{x}_{jklp}$ تخصیص می‌دهیم. این گام را تا تخصیص کامل تقاضا تکرار می‌کنیم.
- گام دوم: مقدار کالای حمل شده (خارج شده) از هریک از مراکز توزیع را به دست می‌آوریم:

$$A_{jp}=\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\bar{x}_{jklp} \qquad (۱۷)$$

- گام سوم: از چهار روش زیر (چهار نوع ماتریس هزینه) برای تعیین مقادیر x_{ijlp} استفاده می‌کنیم:
  ۱. استفاده از ماتریس هزینه معادل CF_{ijl}
  ۲. استفاده از ماتریس هزینه متغیر C_{ijlp}
  ۳. استفاده از ماتریس هزینه ثابت $F_{ijl,1}$
  ٤. به صورت تصادفی

برای سه رویکرد اول روش تخصیص بدین صورت است که کوچکترین عنصر در ماتریس هزینه در نظر گرفته می‌شود و مقدار x_{ijlp} مربوط به آن عنصر برابر کوچکترین چهار پارامتر مقدار A_{jp}، میزان منبع در دسترس، میزان ظرفیت وسیله نقلیه و میزان ظرفیت مسیر مربوطه قرار داده می‌شود. در رویکرد چهارم عنصر مربوطه جهت تخصیص به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تخصیص مانند سه رویکرد دیگر صورت می‌گیرد. این گام تا تخصیص کامل مقادیر A_{jp} ادامه می‌یابد.

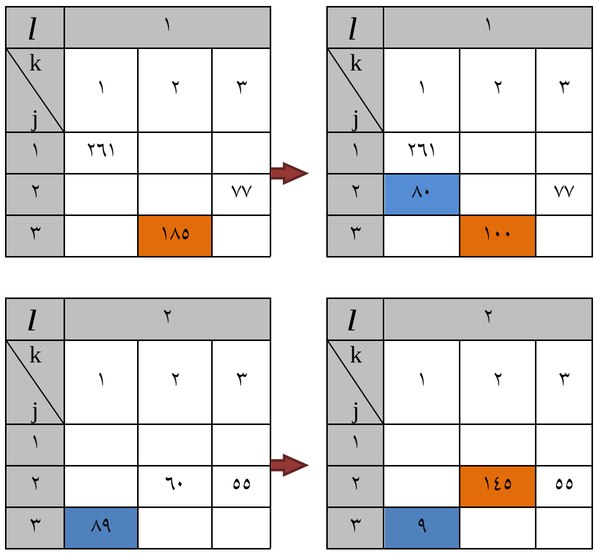
- گام چهارم: برای هر کدام از چهار طرح توزیعی ارائه شده مقدار $TC1$ را محاسبه می‌کنیم. این مقدار از جمع هزینه‌های ارسال متغیر و ثابت از نقاط منابع به مراکز توزیع به دست می‌آید. با استفاده از مقدار $TC1$ چهار طرح توزیعی ارائه شده ارزیابی شده و بهترین آن‌ها به عنوان x_{ijlp} انتخاب می‌شود.

- **روش‌های ایجاد همسایگی**

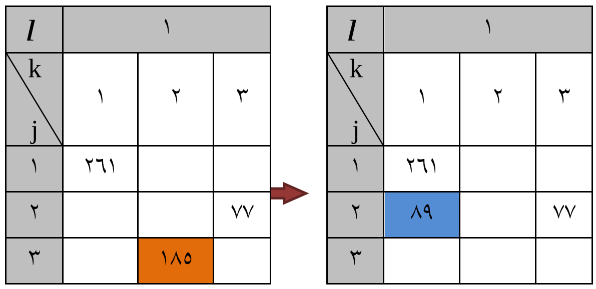
برای ایجاد همسایگی از عملگرهای جهش استفاده می‌کنیم. جهش را بر روی $\bar{x}_{jklp}$ انجام داده و سپس با توجه به $\bar{x}_{jklp}$ به دست آمده، با توجه به توضیحات بخش قبل، مقادیر x_{ijlp} را تعیین می‌کنیم. ابتدا به ازای هر عضو از $\bar{x}_{jklp}$ یک عدد تصادفی Rبین صفر و یک ایجاد می‌کنیم. در صورتی‌که R کوچکتر از نرخ جهش در نظر گرفته باشد، روی آن عنصر خاص جهش را انجام می‌دهیم. در این بخش دو نوع جهش از نوع جایگذاری و تعویض تعریف شده است به نحوی که جواب شدنی باقی بماند.

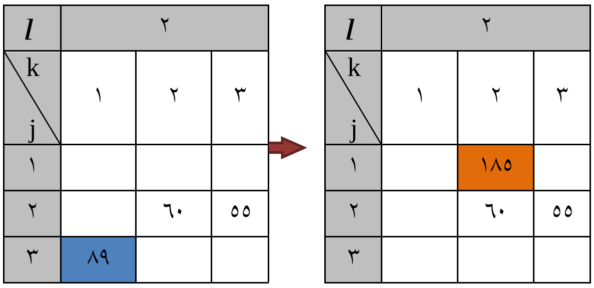
– جایگذاری: ابتدا یک خانه از جدول برای جهش انتخاب می‌شود، سپس یک خانه دیگر از جدول به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (یعنی مرکز توزیعی دیگر و وسیله نقلیه جدید) و بخشی از مقدار عنصر انتخاب شده برای جهش به این عنصر جدید منتقل می‌شود، مرکز توزیع جدید و وسیله نقلیه جدید انتخاب شده بخشی از عمل انتقال کالا را انجام می‌دهند. شکل ۲ نحوه تولید همسایگی در این روش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است بعد از اعمال جهش جمع مقادیر هر ستون ثابت مانده و برابر میزان تقاضا است. در نتیجه با اعمال روش جایگذاری جواب شدنی باقی می‌ماند.

– تعویض: در این نوع تولید همسایگی، دو خانه از جدول با مراکز توزیع و وسایل نقلیه متفاوت انتخاب شده و مقدار حمل این دو عنصر انتخاب شده با یکدیگر تعویض می‌شوند. در این روش نیز چون جمع مقادیر هر ستون تغییر نمی‌کند، جواب شدنی باقی می‌ماند. شکل ۳ این نوع جهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. ماتریس جواب اولیه و ماتریس جواب بعد از تولید همسایگی از نوع جایگذاری





شکل۳. ماتریس جواب اولیه و جواب بعد از تولید همسایگی از نوع تعویض

۴-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم تبرید شبیه سازی شده

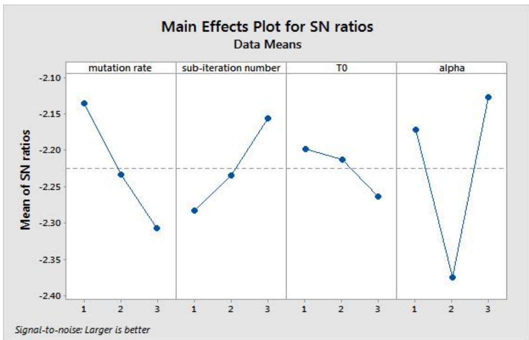
روش تاگوچی برای تخمین بهینه پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر یک مدل به کار می‌رود و روشی بر مبنای محاسبات ریاضی و طراحی آزمایش‌ها است. در این رویکرد، از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای ارزیابی سطوح مختلف پارامترها استفاده می‌شود. در این روش ابتدا پارامترهایی که بر روی الگوریتم تأثیر می‌گذارند، شناسایی شده و بر مبنای شاخص‌های ورودی (معمولاً مقدار تابع هدف)، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این بررسی با توجه به آرایه متعامد ترکیباتی از سطوح مختلف پارامترها را تعیین کرده و مسأله در اندازه مناسب را حل کرده و با توجه به جواب‌ها مقادیر مطلوب برای تنظیم پارامترها پیشنهاد می‌شود. برای کارایی بیشتر هر مسأله پنج بار اجرا شده و متوسط مقادیر در نظر گرفته شده است. در اینجا پارامترهای نرخ جهش، حداکثر تعداد زیرتکرارها، دمای اولیه و ضریب کاهش دما به عنوان پارامترهای تأثیرگذار انتخاب شده و مقادیر این پارامترها در سه سطح در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۲. سطوح پارامترهای الگوریتم SA

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
نرخ جهش	۰/۱	۰/۳	۰/۵
حداکثر تعداد زیرتکرارها	۱۰	۱۵	۲۰
دمای اولیه	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
ضریب کاهش دما	۰/۸	۰/۸۳	۰/۸۵

شکل ٤، نمودار سیگنال به نویز تاگوچی مربوط به الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در ابعاد کوچک را برای یک مثال در حالت استوار در ابعاد ۲×۲×٤×۳×۵ نشان می‌دهد. طبق این نمودار برای نرخ تولید همسایگی مقدار ۰/۱، برای حداکثر تعداد زیر تکرارها

مقدار ۲۰، برای دمای اولیه مقدار ۴۰۰ و برای α مقدار ۰/۸۵ انتخاب می‌شود.



شکل ٤. نمودار سیگنال به نویز در روش تاگوچی برای الگوریتم SA

۵. نتایج

در این قسمت کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در مقایسه با مسائلی که قابل حل با نرم‌افزار GAMS هستند مقایسه می‌شود. در جدول ٤، برای ۱۳ مسأله در ابعاد کوچک و متوسط و بزرگ با استفاده از روش TH، الگوریتم SA هر کدام ۵ بار اجرا و میانگین زمان حل، میانگین مقدار تابع هدف، بهترین مقدار تابع هدف، درصد خطای بهترین جواب و میانگین درصد خطای این الگوریتم در این ۵ بار اجرا نشان داده شده است. درصد خطای بهترین جواب در هر مسأله از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود که در آن، f_{Best} بهترین مقدار تابع هدف و f_{GAMS} مقدار تابع هدف به دست آمده از حل با نرم افزار GAMS است [Barzinpour et al. 2014]

$$BSE = \frac{f_{Best} - f_{GAMS}}{f_{GAMS}} \times 100 \qquad (۱۸)$$

متوسط درصد انحراف نسبی هر بار اجرای الگوریتم در هر مسأله، از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود که در این رابطه، $f_{\text{Algorithm}}$ مقدار تابع هدف الگوریتم در هر بار اجرا و f_{Best} بهترین مقدار تابع هدف در ۵ بار اجرا است و متوسط RPD، متوسط درصد خطای الگوریتم را در هر مسأله نشان می‌دهد [Ruiz and Stutzle, 2007].

$$RPD = \frac{f_{\text{Algoritm}} - f_{Best}}{f_{Best}} \times 100 \qquad (۱۹)$$

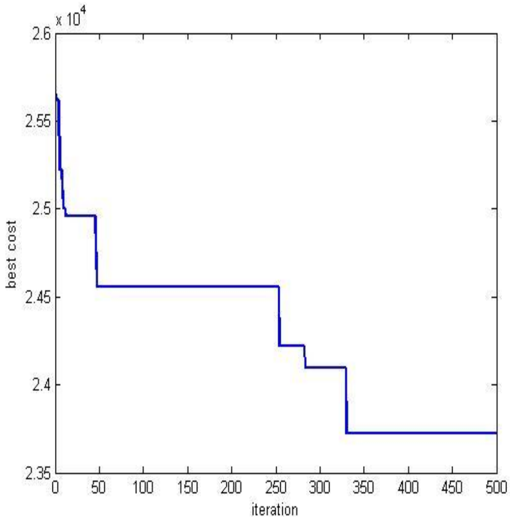
پارامترهای ورودی مسأله طبق جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند و سپس نتایج اجرای الگوریتم SA و مقایسه آن با نتایج حاصله از حل GAMS در جدول ٤ نشان داده می‌شود.

جدول ۳. مقادیر پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
d_{kp}	U (100,130)	$f_{jkl,1}$	U(35,75)
s_{ip}	U(120,180)	$f_{ijl,2}$	U(80,100)
cap_l	U(300,500)	$f_{jkl,2}$	U(80,100)
c_{ijlp}	U(3,8)	$\bar{c}_{jklp}$	U(4,8)
$f_{ijl,1}$	U(35,75)	A_{ijl} ، $\bar{A}_{jkl}$	U(400,500)
r_{ijl}	U(1000,1500)	$\bar{r}_{jkl}$	U(1000,1500)

- **نمایش همگرایی الگوریتم تبرید شبیه سازی شده**

شکل ۵ نحوه همگرایی الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به جواب را نشان می‌دهد. تعداد تکرارها ۵۰۰ تکرار در نظر گرفته شده که از تکرار ۳۳۰ جواب ثابت مانده است.



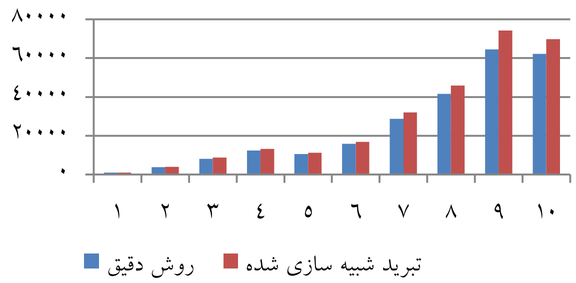
شکل ۵. نحوه همگرایی الگوریتم SA به جواب نهایی

جدول ٤. نتایج اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و مقایسه نتایج با حل GAMS

شماره مسأله	مشخصات مسأله					روش حل					RPD	BSE
						دقیق		شبیه‌سازی تبرید				
	تعداد منابع	تعداد مراکز توزیع	تعداد نقاط تقاضا	تعداد انواع کالا	تعداد انواع وسایل نقلیه	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	متوسط مقادیر تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	متوسط زمان حل (ثانیه)		
١	٢	٢	١	١	٢	١٠٥٥	٠/٣٢	١٠٥٥	١٠٥٥	٠/١١	٠	٠
٢	٣	٢	٢	٢	٢	٣٨٤٦	٠/٥	٣٩٦٨	٣٩٠٠	٠/٣٢	٠/٠٢	٠/٠١
٣	٤	٣	٤	٢	٢	٨١٠٤	٣	٨٧٤٤	٨٧٤٣	١/٢٢	٠/٠٨	٠/٠٨
٤	٥	٣	٤	٣	٢	١٢٣٠٠	٥	١٣٢١٥	١٣١٦٩	٤	٠/٠٠٣	٠/٠٧
٥	٨	٣	٤	٣	٤	١٠٥٢٢	٦٥	١١٢٧٠	١١٢٧٠	١٠	٠	٠/٠٧
٦	٩	٤	٥	٣	٤	١٥٨٠٧	١٩٠٠	١٦٨٠٤	١٦٧٦٢	١٧٦	٠/٠٠٢	٠/٠٦
٧	٩	٤	٧	٤	٤	٢٨٧٧٦	٣٠٠٠	٣٢٣٠١	٣٢٠٦٦	١٨٧	٠/٠٠٧	٠/١١
٨	١٠	٥	٨	٥	٥	٤١٥٩٩	٣٦٠٠	٤٥٨٩٥	٤٥٨٠٤	٣٤٧	٠/٠٠٢	٠/١٠
٩	١٥	٦	١١	٦	٥	٦٤٥٠٧	٣٦٠٠	٧٤٢٩٦	٧٤٢٩٦	٨٩٥	٠	٠/١٥
١٠	٢٠	١٠	١١	٦	٦	٦٢٢٩٦	٣٦٠٠	٧٢٢٦٩	٦٩٨٦٣	١٨١٣	٠/٠٣	٠/١٢
١١	٢٢	١٠	١٥	٦	٦	–	–	١٠٠٩٦٠	١٠٠٤٤٠	١٣٥٠	–	–
١٢	٢٥	١٠	١٥	٦	٧	–	–	١٠٣٦٨٠	١٠٢٦٧٠	١٣٧٣	–	–
١٣	٣٠	١٢	١٨	٨	٧	–	–	١٥٩٥٩٤	١٥٩٣٥٠	١٦٩٧	–	–
متوسط کل						**٢٤٨٨١**	**١٦٧٧**	٤٩٥٤٢	٤٩١٨٣	٦٠٤	٠/٠١٤	٠/٠٧٧

همانطور که در جدول ٤ مشاهده می‌شود، متوسط درصد انحراف نسبی تابع هدف ١/٤٪ و درصد خطای بهترین جواب ٧/٧٪ است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده ارائه شده است.

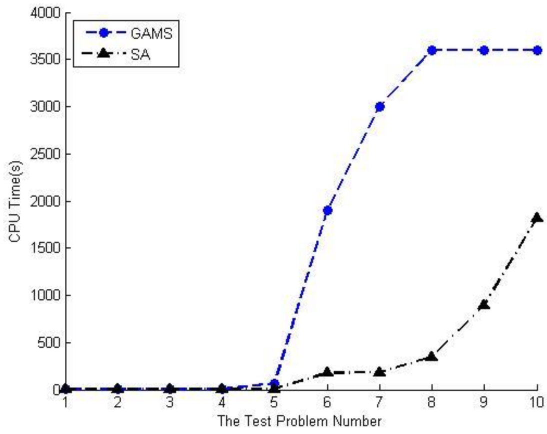
شکل ٦ به مقایسه مقادیر تابع هدف در دو روش دقیق و تبرید شبیه‌سازی شده می‌پردازد. اختلاف کم بین دو روش را در شکل می‌توان مشاهده نمود.



شکل ٦. مقایسه توابع هدف حل دقیق و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

- **تحلیل زمان حل**

شکل ٧ به مقایسه زمان‌های اجرای نمونه مسائل مختلف در حل دقیق و زمان‌های اجرای مسائل در هریک از دو الگوریتم فرا ابتکاری توسعه داده شده می‌پردازد. همانطور که در دو نمودار مشخص است، با بزرگ شدن ابعاد مسأله زمان حل روش دقیق به صورت نمایی افزایش می‌یابد در حالیکه زمان اجرای الگوریتم‌های فرا ابتکاری با شیب ملایم افزایش می‌یابد.



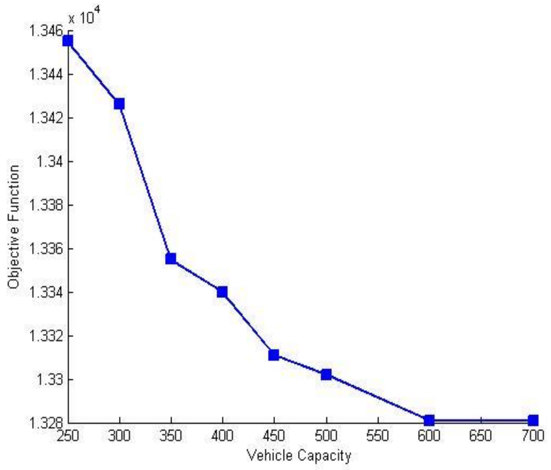
شکل ۷. مقایسه زمان اجرای حل دقیق و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

۵-۱ تحلیل حساسیت

در این بخش میزان حساسیت مدل به پارامترهای مهم مسأله مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو پارامتر ظرفیت وسیله نقلیه و مقدار A_{ijl} , $\overline{\mathrm{A}}_{jkl}$ که به ازای حمل بیش از این مقدار مسأله متحمل هزینه اضافه ثابت می‌شود، به عنوان پارامترهای حساس مسأله انتخاب شده‌اند.

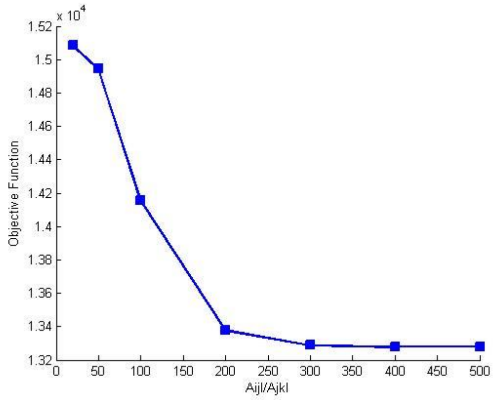
با استفاده از نرم افزار GAMS، یک مسأله در ابعاد ۳×۲×۵×٤×۷ به ازای مقادیر مختلف دو پارامتر حل شده و تغییرات تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر پارامتر ظرفیت وسیله نقلیه بین ۲۵۰ و ۷۰۰ در نظر گرفته شده (برای مقادیر کمتر از ۲۵۰ مسأله جواب شدنی ندارد.) و مقادیر پارامتر A_{ijl} , $\overline{\mathrm{A}}_{jkl}$ از ۲۰ تا ۵۰۰ متغیر است.

شکل ۸ روند تغییرات تابع هدف را نسبت به تغییرات ظرفیت وسایل نقلیه نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش ظرفیت وسایل نقلیه، میزان تابع هدف کاهش می‌یابد. این امر با توجه به وجود محدودیت‌های مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه به این شکل قابل توجیه است که با افزایش ظرفیت، آزادی عمل بیشتری در حمل کالا به وجود می‌آید که این امر سبب بهبود در مقدار تابع هدف می‌شود.



شکل ۸ میزان حساسیت تابع هدف در مقابل تغییرات ظرفیت وسایل نقلیه

شکل ۹ میزان حساسیت تابع هدف نسبت به تغییرات پارامترهای A_{ijl} , $\overline{\mathrm{A}}_{jkl}$ را نمایش می‌دهد. با افزایش مقدار این پارامترها میزان تابع هدف کاهش می‌یابد. هرچه مقادیر A_{ijl} , $\overline{\mathrm{A}}_{jkl}$ کمتر باشند یعنی به ازای حمل مقادیر کمتر نیز مسأله متحمل هزینه ثابت اضافی می‌شود؛ در نتیجه هزینه ثابت بالاتری به مسأله تحمیل شده و مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد.



شکل۹. میزان تغییرات تابع هدف در مقابل تغییرات A_{ijl} , $\overline{\mathrm{A}}_{jkl}$

دغدغه مدیران حوزه حمل و نقل، ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش هزینه‌ها است. با بررسی‌های دقیق و مشورت با برنامه‌ریزان، دو عامل ظرفیت وسایل نقلیه و هزینه ثابت پله‌ای از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار در بحث هزینه‌ها مطرح است که برای این منظور در این مقاله به تحلیل حساسیت آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به شکل ۸ و با در نظر گرفتن هزینه‌های جانبی در زمینه حمل و نقل (هزینه عوارض و جاده، استهلاک

وسیله نقلیه، هزینه سوخت، احتمال تصادفات و حوادث جاده‌ای و ...) استفاده از یک وسیله نقلیه با ظرفیت بالا نسبت به استفاده از چند وسیله نقلیه با ظرفیت پایین، مقرون به صرفه‌تر است. از سوی دیگر با توجه به شکل ۹، با حمل مقدار زیاد بار با یک وسیله نقلیه احتمال بیشتر شدن مقدار حمل از حد تعیین شده وجود دارد که این امر به علت پله‌ای بودن هزینه‌ها، به پرداخت هزینه ثابت اضافی منجر می‌شود؛ بنابراین این دو عامل (ظرفیت وسایل و هزینه ثابت پله‌ای) از هم مستقل نیستند و لازم است مدیران با سنجیدن جوانب مختلف مسأله، هزینه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دهند و با در نظر گرفتن توأمان دو ویژگی مطرح شده و برقراری تعادل بین آنها، بهترین تصمیم را در مورد انتخاب وسیله نقلیه و مقدار حمل در هر مسیر اتخاذ کنند تا به حداقل هزینه‌های ممکن براساس شرایط دنیای واقعی دست یابند.

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، به مدل‌سازی و حل مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای، چندکالایی و دوسطحی و با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت پرداخته شده است. نوآوری این مطالعه در توسعه مدل حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای و ارائه الگوریتم فراابتکاری SA برای حل مدل جدید است. مفاهیمی چون حمل چند نوع محصول، حمل با چند نوع وسیله نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت (solid)، دوسطحی بودن و محدودیت ظرفیت در مسأله حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای لحاظ شده است که در مطالعات پیشین مشاهده نشده بود. به علت NP-hard بودن مسأله یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسأله پیشنهاد شد و با استفاده از این الگوریتم، مدل پیشنهادی حل و نتایج آن با نتایج حاصل از حل دقیق مسأله مقایسه شد که این مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی برای مسأله مورد نظر را نشان داد. برای تحقیقات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- بررسی حمل و نقل هزینه ثابت پله‌ای چند مده (در نظر گرفتن چند حالت برای حمل و نقل مانند زمینی، ریلی، هوایی و...)
- در نظر گرفتن امکان تبادل کالا بین منابع، بین مراکز توزیع و یا بین نقاط تقاضا
- در نظر گرفتن امکان ارسال مستقیم کالا از تولید کننده به مشتری (بدون استفاده از مراکز توزیع)
- در نظر گرفتن عدم قطعیت روی دیگر پارامترهای مسأله مانند عرضه، تقاضا، ظرفیت و ...

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Fixed-Charge Transportation Problem (FCTP)
2. Multi-Commodity
3. Capacitated
4. Two-Stage
5. Cat Swarm Optimization (CSO)
6. Artificial Immune System (AIS)
7. Sheep Flock Algorithm (SFA)
8. Hybrid Particle Swarm Optimization (Hybrid PSO)
9. Step Fixed-Charge Transportation (SFCTP)
10. Memetic Algorithm (MA)

۸. مراجع

- Altassan, K. M., El-Sherbiny, M. M. and Sasidhar, B. (2013) "Near optimal solution for the step fixed charge transportation problem", Applied Mathematics and Information Sciences, Vol. 7, No. 2, January, pp. 661-669.

- Balaji, A. N. and Jawahar, N. (2010) "A simulated annealing algorithm for a two-stage fixed charge distribution problem of a supply chain", International Journal of Operational Research, Vol. 7, No. 2, January, pp. 192-215.

- Balinski, M. L. (1961) "Fixed-cost transportation problems", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 8, No. 1, March, pp. 41-54.

- Barzinpour, F., Saffarian, M., Makoui, A. and Teimoury, E. (2014). "Metaheuristic algorithm for solving bi-objective possibility planning model of location-allocation in disaster relief logistics", Journal of Applied Mathematics, Vol. 2014, Article ID 239868, April, pp. 1-17.

- Busetti, F. (2003) "Simulated annealing overview", JP Morgan, Italy.

problem", International Conference on Technology and Business Management, March, pp. 1-26.

- Manimaran, P. and Selladurai, V. (2014) "Cat swarm optimization for single stage supply chain distribution system with fixed charges", ICTACT Journal on Soft Computing, Vol. 4, No. 2, January, pp. 687-691.

- Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., Mahmoodirad, A. and Rahimian, M. (2014) "Step fixed charge transportation problems via genetic algorithm", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 7, No. 7, July, pp. 949-954.

- Pintea, C. M. and Pop, P. C. (2015) "An improved hybrid algorithm for capacitated fixed-charge transportation problem", Logic Journal of IGPL. Vol. 23, No. 3, pp. 369-378.

- Pramanik, S., Jana, D. K., Mondal, S. K. and Maiti, M. (2015) "A fixed-charge transportation problem in two-stage supply chain network in Gaussian type-2 fuzzy environments", Information Sciences, No. 325, December, pp. 190-214.

- Ruiz, R. and Stützle, T. (2007) "A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem", European Journal of Operational Research, Vol. 177, No. 3, March, pp. 2033-2049.

- Sandrock, K. (1988) "A simple algorithm for solving small, fixed-charge transportation problems", Journal of the Operational Research Society, No. 39, May, pp. 467-475.

- Thiongane, B., Cordeau, J. F. and Gendron, B. (2015) "Formulations for the non-bifurcated hop-constrained multi-commodity capacitated fixed-charge network design problem", Computers and Operations Research, Vol. 2015, No. 53, January, pp. 1-8.

- Torabi, S. A. and Hassini, E. (2008) "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning". Fuzzy Sets and Systems, Vol. 159, No. 2, January, pp. 193-214.

- Ekşioğlu, S. D., Ekşioğlu, B. and Romeijn, H. E. (2007). "A Lagrangean heuristic for integrated production and transportation planning problems in a dynamic, multi-item, two-layer supply chain", IIE Transactions, Vol. 39, No. 2, February, pp. 191-201.

- El-Sherbiny, M. M. (2012) "Alternate mutation based artificial immune algorithm for step fixed charge transportation problem", Egyptian Informatics Journal, Vol. 13, No. 2, July, pp. 123-134.

- El-Sherbiny, M. M. and Alhamali, R. M. (2013) "A hybrid particle swarm algorithm with artificial immune learning for solving the fixed charge transportation problem", Computers and Industrial Engineering, Vol. 64, No. 2, February, pp. 610-620.

- Giri, P. K., Maiti, M. K.and Maiti, M. (2015). "Fully fuzzy fixed charge multi-item solid transportation problem", Applied Soft Computing,Vol. 2015, No. 27, February, pp. 77-91

- Hajiaghaei-Keshteli, M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010) "Addressing a nonlinear fixed-charge transportation problem using a spanning tree-based genetic algorithm", Computers and Industrial Engineering, Vol. 59, No. 2, September, pp. 259-271.

- Jo, J. B., Li, Y. and Gen, M. (2007) "Nonlinear fixed charge transportation problem by spanning tree-based genetic algorithm", Computers and Industrial Engineering, Vol. 53, No. 2, September, pp. 290-298.

- Kannan, D., Govindan, K. and Soleimani, H. (2014) "Artificial immune system and sheep flock algorithms for two-stage fixed-charge transportation problem", Optimization, Vol. 63, No. 10, October, PP. 1465-1479.

- Kowalski, K. and Lev, B. (2008) "On step fixed-charge transportation problem", Omega, Vol. 36, No. 5, October, pp. 913-917.

- Kumar, P. R. (2014) "On modeling the step fixed charge transportation

رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن – استرالیا اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین‌برن – استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم‌های صنعتی (مکان‌یابی و استقرار تسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.

حسنی ملانوری شمسی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹٤ از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی است.

فاطمه صبوحی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع گرایش صنایع را در سال ۱۳۹٤ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در حال حاضر دانشجوی دکتری رشته مهندسی صنایع در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، طراحی شبکه زنجیره تأمین امداد و بالایا و طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور است.

مصطفی حاجی آقائی کشتلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۸۷ را از دانشگاه علم و فرهنگ اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه سازی در حوزه‌های زنجیره تامین، هوش مصنوعی و الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری بوده و در حال حاضر، ایشان استادیار گروه مهندسی صنایع در دانشگاه علم و فنآوری مازندران است.