

مساله مسیریابی وسائط نقلیه با هدف کاهش سوخت مصرفی و تعداد وسائط نقلیه توسط الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات

نرگس نوروزی^{۱*}، جعفر رزمی^۲ و محسن صادق عمل‌نیک^۳

^۱ دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی صنایع - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی صنایع - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی صنایع - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۱/۴/۱۰، تاریخ دریافت اصلاح‌شده ۹۱/۵/۷، تاریخ تصویب ۹۱/۱۲/۱۲)

چکیده

این مقاله به ارائه مدل جدیدی از مساله مسیریابی وسائط نقلیه به منظور کاهش سوخت مصرفی و اندازه ناوگان می‌پردازد. مدیران شرکت‌های توزیع و صاحبان وسائط نقلیه به دو دلیل مهم علاقه‌مند به حداقل رساندن سوخت مصرفی در توزیع کالاها می‌باشند؛ (۱) کاهش در سوخت مصرفی به کاهش هزینه‌های سرویس‌دهی و در نتیجه رضایت مشتریان می‌انجامد و (۲) کاهش در مصرف سوخت به کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا منجر می‌شود. همچنین استفاده از حداقل ناوگان برای سرویس‌دهی به مشتریان به منظور کاهش هزینه‌های ثابت و دیگر هزینه‌های مرتبط با وسائط نقلیه در این مقاله مدنظر قرار گرفته است. به دلیل NP-Hard بودن مساله مورد بررسی و به منظور حل مسایل در ابعاد بزرگ از روش فراابتکاری بهبود یافته‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO) استفاده می‌شود. سپس برای نشان دادن کارایی الگوریتم طراحی شده جواب‌های به دست آمده با نرم افزار لینگو مقایسه خواهند شد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسائط نقلیه سبز، نرخ سوخت مصرفی، الگوریتم بهبود یافته‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات

مقدمه

مسئله اولین بار توسط دنتزیگ و رامسر [۱] فرموله و بر اساس روش‌های ریاضی به حل آن پرداخته شد. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) به مجموعه‌ای از مسایل اطلاق می‌شود که در آن ناوگانی متشکل از چندین وسیله نقلیه از یک یا چند قرارگاه، به ارایه خدمت به مشتریان مستقر در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند و این کار را به نحوی انجام می‌دهند که هزینه‌های انجام این کار به حداقل برسد. وسیله نقلیه با شروع از قرارگاه مرکزی، پس از ارایه خدمت به مشتریان به قرارگاه باز می‌گردد. هر وسیله، ظرفیت معینی دارد و همه مسیرهای مربوطه از مبدأ (قرارگاه مرکزی) شروع و به آن ختم می‌شوند.

بیشتر تحقیقات انجام گرفته، توجه به اهداف اقتصادی را از راه به حداقل رساندن مسافت طی شده، زمان مورد نیاز یا تعداد وسائط نقلیه مورد نیاز و ... سرلوحه کار خود قرار داده‌اند و از توجه به اهداف زیست محیطی و کاهش آلاینده‌ها غافل مانده‌اند. رزمی و رحمان‌نیا [۲] به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین به منظور تحویل کالا به مشتریان توسط برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کاهش

حمل و نقل، اثرات جبران ناپذیری بر محیط زیست می‌گذارد؛ مصرف منابع، استفاده از اراضی، تأثیرات سمی بر اکوسیستم و انسان‌ها، سر و صدا و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها، فقط نمونه‌ای از این خطرات هستند. جدای از اثرات منفی ذکر شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کربن دی اکسید، به طور مستقیم با سلامتی افراد جامعه و غیر مستقیم با تخریب لایه اوزون ارتباط دارد. لزوم توجه به این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که گازهای گلخانه‌ای متصاعد توسط بخش حمل و نقل، باعث ایجاد بخش قابل توجهی از آلودگی هوا در کشورهای مختلف جهان هستند. از این‌رو افزایش نگرانی‌ها درباره کاهش چنین تأثیرات خطرناکی، ضرورت پیاده‌سازی یک برنامه مدون در حمل و نقل جاده‌ای را نشان می‌دهد که مدل‌های مسیریابی وسائط نقلیه سبز مبتنی بر کاهش سوخت مصرفی و آلودگی هوا، می‌توانند راهگشا باشند.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، یکی از مفاهیم آشنا در زمینه تحقیق در عملیات است که در سه دهه اخیر تلاش‌ها و پیشرفت‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. این

[۹] و کلونی مورچگان [۱۰] در سال‌های اخیر توسعه داده شده‌اند.

همان طور که بیان شد، هدف از این مقاله، ارائه مدلی است که با کاهش سوخت مصرفی، علاوه بر فراهم آوردن منافع اقتصادی، باعث کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، کربن دی‌اکسید و آلودگی هوا شود و از این طریق، منافع بی‌شماری را به محیط زیست و سلامتی افراد جامعه بازگرداند. از سوی دیگر، یکی دیگر از اهداف این مقاله آن است که با حداقل کردن اندازه ناوگان، هزینه‌های ثابت و دیگر هزینه‌های مرتبط با وسائط نقلیه، به حداقل برسد. ثابت شده است که مسئله مسیریابی وسائط نقلیه، یک مسئله NP-Hard است [۱۱] و استفاده از روش‌های دقیق در مورد مسایل با ابعاد به نسبت بزرگ، نمی‌تواند توجیه‌پذیر باشد؛ به همین دلیل، با افزایش ابعاد مسئله باید از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسایل استفاده شود. به همین منظور الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO) برای حل مسایل در ابعاد بزرگ در نمونه مسائل کریستوفیدز و همکاران [۱۲] ارائه شده است. سپس برای نشان دادن کارایی الگوریتم طراحی شده، جواب‌های به دست آمده با نرم‌افزار لینگو مقایسه خواهند شد.

۲- تعریف مسئله

تحقیقات محققان حاکی از آن است که هزینه‌های حمل و نقل به عوامل بسیاری وابسته است که می‌توانند به دو دسته کلی تقسیم‌بندی شوند. عوامل دسته اول شامل فاصله، بار، سرعت، وضعیت جاده، نرخ مصرف سوخت (در هر واحد فاصله)، قیمت سوخت و... که ارتباط مستقیم با برنامه زمانبندی سفر دارند، است. عوامل دسته دوم، ارتباط غیر مستقیم با زمانبندی سفر دارند و شامل استهلاک وسیله نقلیه، نگهداری و تعمیرات، دستمزد رانندگان، مالیات و... می‌شوند [۱۳]. همان‌طور که مشخص است، عوامل دسته اول ارتباط مستقیم با مصرف سوخت و انرژی دارند و بنابراین می‌توانند به عنوان هزینه متغیر یا هزینه سوخت مصرفی در نظر گرفته شوند. در مجموع اگر دیگر عوامل ذکر شده ثابت نگاه داشته شوند، مصرف سوخت به طور عمده به مسافت طی شده و بار حمل شده وابسته خواهد بود. برای مثال هزینه متغیر یک وسیله نقلیه خالی، کمتر از هزینه وسیله نقلیه با بار پر خواهد

هزینه حمل و نقل و افزایش رضایت مشتریان پرداختند. پالم [۳]، مدلی یکپارچه در مسیریابی و انتشار آلاینده‌ها برای وسائط نقلیه ارائه کرد و نقش سرعت را در کاهش کربن دی‌اکسید تولیدشده با سناریوهای مختلف ترافیکی و پنجره زمانی در نظر گرفت که به صرفه‌جویی ۵٪ در میزان کربن دی‌اکسید تولید شده دست یافت. گرچه تأثیر میزان بار حمل شده در مسئله او در نظر گرفته نشده بود.

میدن و همکارانش [۴] مسئله VRP با محدودیت پنجره زمانی را که در آن، سرعت به زمان سفر وابسته بود، در نظر گرفتند. همچنین یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد کردند و در نتایج خود به صرفه‌جویی ۷٪ در کربن دی‌اکسید تولید شده در یک مطالعه موردی در کشور انگلستان دست یافتند. جبلی و همکارانش [۵] مسئله‌ای مشابه کار میدن در نظر گرفتند، با این تفاوت که میزان تولید آلاینده‌ها بر اساس یک تابع خطی از سرعت وسیله نقلیه تخمین زده می‌شود و تحلیلی برای یافتن سرعت بهینه با توجه به میزان آلاینده‌ها ارائه کردند. همچنین از یک الگوریتم جستجوی ممنوع (TS) تکرار شونده برای حل نمونه مسائل استاندارد VRP استفاده کردند.

در همین راستا، تاواریس و همکارانش [۶] به بررسی تأثیر شیب جاده و بار وسیله نقلیه بر میزان سوخت مصرفی در مسئله جمع‌آوری ضایعات و فقط برای سه سطح بار پرداختند. بار نیمه، هنگام جمع‌آوری ضایعات، بار کامل، در راه رفتن به محل تخلیه و بدون بار، در مسیر بازگشت. ارتباط میان نرخ مصرف سوخت و میزان بار در تحقیق آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفت. ولی بدیهی است هنگامی که وسیله نقلیه به گره‌ای سرویس‌دهی می‌کند، میزان بار آن کاهش می‌یابد که منجر به کاهش نرخ سوخت مصرفی در طول مسیر می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن نرخ سوخت وابسته به بار، در محاسبه دقیق‌تر هزینه‌ها ضروری است. همچنین سوزوکی [۷] علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر میزان بار بر مصرف سوخت وسیله نقلیه، به بررسی تأثیر زمان انتظار وسیله نقلیه در شروع سرویس‌دهی به مشتریان بر سوخت مصرفی پرداخت. با پیشرفت‌های اخیر در حل اینگونه مسایل و با در نظر گرفتن فرضیات و قیود پیچیده‌تر، روش‌های فراابتکاری همانند روش الگوریتم ژنتیک [۸]، بهینه‌سازی انبوه ذرات

هزینه مسافرت بین دو نقطه i و j است. برای هر مشتری S_i یک تقاضای $q_i \geq 0$ و یک زمان خدمت در نظر گرفته شده است. همان طور که بیان شد، یکی از نوآوری‌های این مقاله، در نظر گرفتن دو تابع هدف به طور همزمان است. هدف تعیین مسیر بهینه به گونه‌ای است که همه مشتری‌ها توسط حداقل تعداد وسیله نقلیه سرویس داده شوند و میزان مصرف سوخت توسط زمانبندی تحویل به موقع کالاهای سنگین‌تر، به حداقل برسد. پارامترهای به کار رفته در مدل به این شکل بیان می‌شوند:

n تعداد نقاط (مشتری‌ها) است و گره 0 نشان‌دهنده پایانه است.

$$v = \{1, \dots, nv\}$$

q_i تقاضای گره i است بنابراین $q_0 = 0$ است.

$$d_{ij}$$
 فاصله میان گره i به j

a_i میزان باری است که وقتی وسیله نقلیه به گره i می‌رسد، به همراه دارد

$$f_0$$
 میزان سوخت مصرفی در واحد فاصله بدون بار

f_1 میزان اضافی سوخت مصرفی در واحد فاصله برای واحد بار

واحد بار

t_i^v زمان مورد نیاز برای ارایه خدمت به مشتری i ، توسط وسیله نقلیه v

توسط وسیله نقلیه v

t_{ij}^v زمان مورد نیاز برای طی مسیر (i, j) توسط وسیله نقلیه v

وسیله نقلیه v

T حداکثر زمان خدمت‌دهی جهت و زمان طی مسیر توسط وسیله نقلیه

توسط وسیله نقلیه

$$C_v$$
 ظرفیت وسیله نقلیه v

$S = \{i | i = 0, \dots, n\}$ زیر مجموعه‌ای که در آن

است.

$X_{ijv} = 1$ اگر مسیر i به j توسط وسیله نقلیه v طی شود؛ در غیر این صورت برابر 0 است.

در ادامه به ارائه مدل پیشنهادی مسیریابی و سائط نقلیه مبتنی بر کاهش سوخت مصرفی و اندازه ناوگان می‌پردازیم:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } z_1 &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^n \sum_{v=1}^{nv} (f_0 + f_1 a_j) d_{ij} x_{ijv} \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{nv} f_0 d_{i0} x_{i0v} \end{aligned} \quad (1)$$

بود؛ هنگامی که یک مسیر مشخص را با سرعت یکسان طی می‌کنند. با وجود گسترش انواع مختلف مسئله‌های VRP، بیشتر آن‌ها روی کمینه‌کردن هزینه توسط کاهش مسافت طی شده تمرکز کرده‌اند و نرخ مصرف سوخت به عنوان عامل تأثیرگذار در اغلب موارد نادیده انگاشته شده است. از این رو می‌توان به تحقیقات ساهین و همکارانش [۱۴] اشاره کرد که بیانگر آن است که یک کامیون با ظرفیت ۲۰ تن هنگامی که پر از بار است، هزینه سوخت مصرفی آن در طی مسیر ۱۰۰۰ کیلومتر با ۶۰٪ کل هزینه حمل و نقل آن برابری دارد. بنابراین کاهش سوخت مصرفی توسط بهبود کارایی عملیاتی ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس جنبه‌های شناسایی شده از مطالعات مروری VRP و نیز جنبه‌های جدید مشاهده شده از مسایل دنیای واقعی، این مقاله به دنبال طراحی و حل مدلی برای مسیریابی و سائط نقلیه برای کاهش سوخت مصرفی و اندازه ناوگان است که در ادامه بیان خواهد شد.

فرضیات مسئله به صورت ذیل قابل بیان هستند:

- هر وسیله نقلیه از پایانه شروع به حرکت می‌کند و در نهایت باید به پایانه باز گردد.
- تقاضای مشتریان ثابت و قطعی است.
- هر مشتری فقط و فقط از یک وسیله نقلیه توزیع کننده، خدمت دریافت می‌کند و سرویس‌دهی چندگانه مجاز نیست.
- ظرفیت وسایط نقلیه باید به طور دقیق شامل مجموع تقاضای مشتریانی باشد که وسیله نقلیه باید آن‌ها را سرویس دهد و در هر بار سرویس‌دهی، همه تقاضای مشتریان، ارضا می‌شود.
- مجموع زمان‌های سرویس‌دهی وسایط نقلیه به مشتریان محدودیت دارند و ثابت است.
- مسیرها باید طوری تعیین شوند که میزان هزینه حمل و نقل حداقل شود.

۱-۲ مدل ریاضی پیشنهادی مسئله

مسئله مسیریابی و سائط نقلیه را می‌توان به وسیله یک گراف $G=(S,A)$ نشان داد، به طوری که $S = \{i | i = 0, \dots, n\}$ مجموعه نقاط گره‌ها و $A = \{(S_i, S_j) : i \neq j\}$ مجموعه‌ای از کمان‌های متصل‌کننده گره‌ها است. نقطه S_0 نشانگر مبدأ است. $d_{ij} \geq 0$ که با هر کمان (i, j) مرتبط است، نشانگر مسافت یا زمان مسافرت و یا

نقلیه است. محدودیت (۷) بیانگر آن است که مجموع زمان سرویس‌دهی در گره‌ها و مدت زمان عبور از مسیرها توسط وسائط نقلیه، نباید بیشتر از زمان T باشد. قیدهای (۸) و (۹) بیانگر آن هستند که مبدأ و مقصد همه وسائط نقلیه، پایانه است. همچنین رابطه (۱۰) مربوط به حذف زیرگردها است.

۳- رویکردهای حل مسئله

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته انبوه ذرات

برای حل این مدل، از الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO) استفاده می‌شود. الگوریتم IPSO همانند الگوریتم PSO است، با این تفاوت که در هر بار محاسبه مقدار تابع هدف، از روش‌های بهبود همانند $2-opt^*$ استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، زمان حل نسبت به PSO کمتر می‌شود. همچنین جواب‌های ارایه شده بهتر می‌شوند [۱۵ و ۱۶].

الگوریتم IPSO، یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی بر اساس جمعیت است که از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی گروه پرندگان و ماهیان مدل‌سازی شد. در ابتدای الگوریتم، تعدادی از ذرات (پرنده) به طور تصادفی تولید می‌شوند، سپس به هر یک از آن‌ها، سرعتی نسبت داده می‌شود. بر اساس سرعت فعلی ذره و فاصله آن از بهترین موقعیتی که تا کنون توسط خود او دیده شده است و نیز فاصله او از بهترین موقعیت یافت‌شده توسط ذرات مجاور، سرعت جدیدی برای آن ذره محاسبه می‌شود و با توجه به این نکته که مقدار سرعت به دست آمده، برابر با مقدار جابه‌جایی ذره در طی یک مرحله است، می‌توان موقعیت جدید ذره را در مرحله بعدی، پس از به روز رسانی موقعیت به دست آورد. این فرآیند سپس تا تعداد تکرار مشخصی انجام می‌گیرد و در نهایت، بهترین مکان ملاقات‌شده توسط همه ذرات به عنوان جواب مسئله ارایه می‌شود [۱۶]. هر ذره در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، از سه بردار d بعدی تشکیل شده است؛ d بعد فضای جستجو است. برای ذره i -ام این سه بردار عبارتند از: x_i موقعیت فعلی ذره، v سرعت حرکت ذره و i بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است و i بهترین مکانی که تا کنون توسط ذرات مجاور یافت شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه، چیزی فراتر از یک مجموعه ذرات است و هیچ یک از ذرات به تنهایی توانایی

$$\text{Minimize } z_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{nv} x_{0jk}$$

S.t

$$\sum_{i=0}^n \sum_{v=1}^{nv} x_{ijv} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{nv} x_{ijv} = 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ipv} - \sum_{j=1}^n x_{pjh} = 0 \quad ; \quad p = 1, 2, \dots, n \quad ; \quad v = 1, 2, \dots, nv \quad (4)$$

$$(a_i - q_i - a_j)x_{ijv} = 0 \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n q_i \sum_{j=1}^n x_{ijv} \leq C_v \quad ; \quad v = 1, 2, \dots, nv \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n t_i \sum_{j=1}^n x_{ijv} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ijv} \leq T \quad ; \quad v = 1, 2, \dots, nv \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0v} \leq 1 \quad ; \quad v = 1, 2, \dots, nv \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jv} \leq 1 \quad ; \quad v = 1, 2, \dots, nv \quad (9)$$

$$\sum_{v=1}^{mv} \sum_{j \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijv} \leq |S| - r(S) \quad ; \quad \forall S \subseteq A - 1 \quad S \neq \emptyset \quad (10)$$

$$x \in S, x_{ij} \in [0, 1], \quad t_i \geq 0 \quad (11)$$

تابع هدف این مدل پیشنهادی، از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول تابع هدف، به کاهش هزینه‌های سوخت مصرفی توسط زمانبندی تحویل به موقع کالاهای سنگین‌تر می‌پردازد و جزء دوم آن به دنبال حداقل کردن اندازه ناوگان است. محدودیت (۲) و (۳) باعث می‌شود که هر گره تقاضا فقط از یک وسیله نقلیه توزیع‌کننده، خدمت دریافت کند. قید (۴)، بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای به گره‌ای وارد شود، باید از آن خارج شود و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار است. محدودیت (۵) بیان می‌کند که اگر $x_{ijv} = 1$ باشد، بار حمل‌شده به گره j (a_j) برابر است با بار حمل‌شده به گره i (a_i) منهای تقاضای گره i . محدودیت (۶) مربوط به حداکثر ظرفیت وسائط

۳-۲- الگوریتم تولید حل اولیه

در این بخش، شیوه نمایش جوابها بررسی می‌شود. برای تولید حل اولیه، رویکرد ابتکاری زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- تشکیل مسیر جدید: ابتدا میزان تقاضای همه گره‌ها را به ترتیب نزولی مرتب کنید؛ سپس گره i را با بیشترین میزان تقاضا که تا کنون سرویس داده نشده است، انتخاب کرده و از مبدأ به گره i ، یک وسیله نقلیه مانند k با حداکثر ظرفیت بفرستید.

۲- تعیین گره‌های همسایه: نزدیک‌ترین گره به گره i با بیشترین میزان تقاضا (مانند گره j) را به گونه‌ای بیابید که اگر وسیله نقلیه k از i به j برود (j را سرویس دهد)، محدودیت‌های احتمالی عبور از مسیرها برای رسیدن به گره j و همچنین ظرفیت وسیله نقلیه نقض نشود. اگر چنین گره‌ای یافت شد، وسیله نقلیه k از i به j فرستاده می‌شود ($x_{ijk} = 1$) و در غیر این صورت به مبدأ باز می‌گردد.

۳- تکمیل مسیر: گام ۲ را آنقدر تکرار کنید تا وسیله نقلیه k به مبدأ بازگردد.

۴- تکمیل سرویس: گام‌های بالا را آنقدر تکرار کنید تا به همه گره‌ها سرویس داده شود.

۵- تعیین تعداد بهینه وسائط نقلیه: بعد از پایان الگوریتم بالا، تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز تعیین می‌شود. همان طور که بیان شد، برای بهبود جوابها در این مسئله، از روش بهبود 2-opt استفاده می‌شود که در ادامه بیان می‌شود:

۳-۲-۱ روش بهبود 2-opt: در این روش جستجوی

محلی، ابتدا دو گره (مشتری) در داخل یک تور انتخاب می‌شوند و سپس ترتیب عبوری وسیله نقلیه در آن دو گره (مشتری) با یکدیگر تعویض می‌شوند. اگر این تعویض هزینه تور را کاهش داد، آن را انتخاب کنید، در غیر این صورت تور دو گره دیگر را انتخاب کرده و سپس مسیر آنها را با یکدیگر تعویض کنید. این کار را برای همه گره‌های موجود در تور باید انجام دهید و هر تعویضی که بیشترین کاهش را در هزینه داشت، انتخاب کنید.

۳-۲-۲ تعیین پارامترها

حل مسئله را ندارند و فقط هنگامی می‌توانند مسئله را حل کنند که با یکدیگر تعامل داشته باشند. در واقع برای انبوه ذرات، حل مسئله یک مفهوم اجتماعی است که از رفتار تک تک ذرات و تعامل میان آنها به وجود می‌آید. با این وجود، اگر تابع برازندگی مسئله مفروضی، تابع f باشد، مقادیر x_i, v_i, y_i در هر مرحله به صورت زیر به روزرسانی می‌شوند:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) \quad (12)$$

$$+c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$$

$$+c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t) \quad (13)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (14)$$

در روابط بالا، w ضریب اینرسی، $r_{1,j}$ و $r_{2,j}$ اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله (۰ و ۱) و c_1 و c_2 اعداد ثابت هستند که به ضرایب شتاب‌دهنده معروف بوده و به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری برای کل جامعه است. $r_{1,j}, r_{2,j}$ باعث می‌شود که نوع گوناگونی در جوابها به وجود بیاید و به این شکل جستجوی کامل‌تری روی فضا انجام گیرد [۱۷]. همان طور که مشاهده می‌شود، موقعیت و سرعت هر ذره در هر مؤلفه ($j=1,2,\dots,n$) به طور جداگانه به روزرسانی می‌شود. شبه کد الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات در شکل (۱) نشان داده شده است.

```

For each particle
Initialize particle
END
Do
  For each particle
    Calculate fitness value
    If the fitness value is better than the best fitness value
      ( $p_{best}$ ) in history
      set current value as the new  $p_{best}$ 
  End

  Choose the particle with the best fitness value of all the
  particles as the  $g_{best}$ 
  For each particle
    Calculate particle velocity according equation (12)
    Update particle position according equation (13)
  End
While maximum iterations or minimum error criteria is not
attained

Terminate the algorithm when the convergence criterion
is satisfied

```

شکل ۱: شبه کد الگوریتم فراابتکاری بهبود یافته‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات

ترتیب شماره مسئله و تعداد مشتریان است. ستون سوم، نشان‌دهنده تعداد وسیله نقلیه است. ستون‌های چهارم تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مسئله توسط لینگو است و ستون ششم تا نهم نشان‌دهنده مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مسئله توسط الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO) هستند.

از مقایسه نتایج محاسباتی توسط الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات IPSO با جواب‌های به دست آمده از لینگو، می‌توان مشاهده کرد که میانگین خطای نتایج محاسباتی توسط الگوریتم توسعه‌داده‌شده، بهینه‌سازی انبوه ذرات IPSO با نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار لینگو ۴/۱۲٪ است که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی است. همچنین زمان حل مسایل توسط لینگو و IPSO به ترتیب برابر ۱۹۷۴/۷۱ و ۳۷/۳۲ است که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسایل در زمان کوتاه است.

همچنین برای بررسی قابلیت الگوریتم ارائه‌شده در ابعاد بزرگ، از مجموعه آزمایش‌های کریستوفیدز و همکاران (۱۹۷۹) استفاده شد که تعداد مسایل نمونه این دسته از مسایل ۱۴ عدد است. نتایج محاسباتی حاصل‌شده در جدول (۳) قابل مشاهده است. در این جدول، ستون اول شماره مسئله است، ستون‌های دوم و سوم به ترتیب نشان‌دهنده تعداد مشتریان و تعداد وسائط نقلیه هستند. ستون‌های چهارم تا نهم به ترتیب نشان‌دهنده مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مسئله توسط لینگو و IPSO است.

در جدول (۳)، برای هر یک از مسایل نمونه، نرم‌افزار لینگو به مدت ۱۰۰۰ ثانیه اجرا شد که نتایج به دست آمده در ستون چهارم جدول قابل مشاهده است. میانگین جواب‌ها برای لینگو و IPSO به ترتیب برابر ۱۵۵۰/۲۴ و ۱۴۰۶/۸۸ است و میانگین خطا برای لینگو برابر ۹/۴۳ درصد است که می‌توان نتیجه گرفت که جواب ارائه‌شده توسط الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO) قادر به حل مسایل در ابعاد بالا است. همچنین زمان حل نمونه مسایل توسط IPSO برابر ۱۰۹/۸۰ ثانیه است که نسبت به حل نمونه مسایل توسط لینگو به مراتب بهتر است.

الگوریتم‌های فراابتکاری اغلب روی پارامترهای خود بسیار حساس هستند و پاسخ‌های به دست آمده، بسیار به میزان پارامترهای آن‌ها بستگی دارند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم IPSO در جدول (۱) نشان داده شده است. برای تنظیم پارامترهای این مسئله از روش آزمایش و خطا استفاده شده است.

تعداد ذره‌ها	۵۰
تعداد تکرارها	۵۰۰
پارامتر c_1	۱/۴۹
پارامتر c_2	۱/۴۹
پارامتر w	۰/۷۲۹

۳- نتایج محاسباتی

در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌شود؛ به همین منظور، دو گروه مسئله، یکی در ابعاد کوچک و دیگری در ابعاد بزرگ طراحی می‌شود. در گروه اول، دسته‌ای از مسایل نمونه کوچک توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل شده و جواب‌های حاصل با جواب‌های حاصل از حل مدل با نرم‌افزار لینگو مقایسه می‌شوند. هدف از آزمایش اول، بررسی توانایی روش پیشنهادی در رسیدن به جواب‌های بهینه است. در گروه دوم، عملکرد الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در حل مسایل بزرگ و با ابعاد واقعی بررسی می‌شود. همچنین، اجرای برنامه‌ها توسط کامپیوتری Corei3 با توانایی ۲/۵ GHZ و حافظه داخلی ۴ GB انجام شده است.

برای ایجاد مسایل کوچک، از توزیع احتمال یکنواخت استفاده شده است. برای تولید اعداد مربوط به مختصات هر مشتری از توزیع یکنواخت با پارامترهای ۰ و ۵۰ استفاده شده است. میزان تقاضای مشتریان با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه ۱ و ۱۰ به دست آمده است. همچنین، مدت زمان لازم برای سرویس‌دهی، با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه ۱ و ۲۰ به دست آمده است. این میزان مصرف سوخت در واحد فاصله بدون همراه داشتن بار ۶۵/ و با به همراه داشتن بار ۳۵/ در نظر گرفته شد. برای بررسی الگوریتم‌های مورد نظر، تعداد ۷ مسئله با ابعاد کوچک تولید شد که مشخصات مسایل در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول، ستون‌های اول و دوم به

جدول ۲: مقایسه نتایج برای مسایل با ابعاد کوچک

حل توسط IPSO			حل توسط لینگو			تعداد وسائط نقلیه	تعداد مشتریان	مسایل نمونه
خطا (%)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب	خطا (%)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب			
۰/۰۰	۷/۵۶	۷۹/۴۶	۰/۰۰	۱۰	۷۹/۴۶	۲	۶	۱
۰/۰۰	۱۹/۸۵	۸۶/۶۹	۰/۰۰	۷۱	۸۶/۶۹	۲	۷	۲
۳/۱۴	۲۹/۹۸	۱۰۸/۹۵	۰/۰۰	۸۳۶	۱۰۵/۶۳	۳	۸	۳
۵/۳۵	۳۰/۳۸	۱۰۰/۶۷	۰/۰۰	۹۲۴	۹۵/۵۵	۲	۹	۴
۶/۷۱	۵۵/۶۸	۱۰۹/۲۳	۰/۰۰	۳۴۱۸	۱۰۲/۳۶	۳	۹	۵
۶/۴۳	۵۶/۵۱	۱۰۵/۱۲	۰/۰۰	۴۲۱۱	۹۸/۷۶	۲	۱۰	۶
۷/۳۰	۶۱/۲۸	۱۲۰/۳۴	۰/۰۰	۴۳۵۳	۱۱۲/۲۵	۳	۱۰	۷
۴/۱۲	۳۷/۳۲	۱۰۱/۴۹	۰/۰۰	۱۹۷۴/۷۱	۹۷/۲۴			میانگین

جدول ۳: نتایج محاسباتی توسط الگوریتم IPSO در ابعاد بزرگ

حل توسط IPSO			حل توسط لینگو			تعداد وسائط نقلیه	تعداد مشتریان	مسایل نمونه
خطا (%)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب	خطا (%)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب			
۰/۰۰	۵۸/۳۶	۷۶۶/۲۶	۲/۲۸	۱۰۰۰	۷۸۴/۷۹	۶	۵۰	۱
۰/۰۰	۶۳/۶۵	۱۲۳۲/۱۰	۱۱/۷۸	۱۰۰۰	۱۲۳۵/۹۶	۹	۷۵	۲
۰/۰۰	۱۰۵/۰۵	۱۱۶۸/۹۱	۴/۴۰	۱۰۰۰	۱۳۲۸/۷۳	۱۰	۱۰۰	۳
۰/۰۰	۱۱۵/۶۵	۱۷۱۹/۳۵	۵/۲۴	۱۰۰۰	۱۸۰۹/۸۵	۱۵	۱۵۰	۴
۰/۰۰	۱۶۹/۱۹	۲۰۱۲/۱۱	۲۹/۶۷	۱۰۰۰	۲۶۰۹/۱۴	۱۸	۱۹۹	۵
۰/۰۰	۵۸/۸۸	۸۲۷/۶۷	۶/۷۹	۱۰۰۰	۸۸۳/۹۱	۷	۵۰	۶
۰/۰۰	۷۱/۳۶	۱۲۲۰/۰۹	۶/۸۹	۱۰۰۰	۱۳۰۴/۱۳	۱۰	۷۵	۷
۰/۰۰	۱۲۱/۱۲	۱۳۰۱/۱۶	۵/۵۲	۱۰۰۰	۱۳۷۳/۰۱	۱۴	۱۰۰	۸
۰/۰۰	۱۲۰/۳۶	۱۷۳۷/۱۲	۳/۷۷	۱۰۰۰	۱۸۰۲/۶۷	۱۷	۱۵۰	۹
۰/۰۰	۱۶۹/۴۴	۲۲۹۳/۷۴	۰/۹۰	۱۰۰۰	۲۳۱۴/۳۹	۲۱	۱۹۹	۱۰
۰/۰۰	۱۲۴/۲۱	۱۵۱۶/۲۳	۲۶/۵۸	۱۰۰۰	۱۹۱۹/۳۴	۱۳	۱۲۰	۱۱
۰/۰۰	۱۰۶/۰۲	۱۲۰۴/۰۶	۱/۳۲	۱۰۰۰	۱۲۱۹/۹۸	۱۰	۱۰۰	۱۲
۰/۰۰	۱۲۶/۳۶	۱۴۶۷/۳۲	۲۳/۱۱	۱۰۰۰	۱۸۰۶/۵۳	۱۵	۱۲۰	۱۳
۰/۰۰	۱۲۷/۶۵	۱۲۷۸/۴۵	۲/۵۷	۱۰۰۰	۱۳۱۱/۳۲	۱۴	۱۰۰	۱۴
۰/۰۰	۱۰۹/۸۰	۱۴۰۶/۸۸	۹/۴۳	۱۰۰۰	۱۵۵۰/۲۴			میانگین

۴- نتیجه گیری

به طور سنتی، مسئله مسیریابی و سائط نقلیه، به یافتن کوتاه‌ترین مسیرها، با در نظر گرفتن انواع مختلف محدودیت‌ها مانند محدودیت ظرفیت، طول مسیر، پنجره زمانی و... می‌پردازد. اگرچه یافتن کوتاه‌ترین مسیر در بسیاری از موارد منجر به یافتن جواب بهینه برای تابع هدف کاهش سوخت مصرفی و آلودگی هوا نمی‌شود؛ زیرا مصرف سوخت به عوامل بسیاری همانند میزان بار وسیله نقلیه، سرعت، وضعیت جاده و... وابسته است. از این رو در این مقاله، یک مدل مسیریابی و سائط نقلیه دو هدفه شامل

کاهش سوخت مصرفی، کاهش اثرات مخرب گازه‌های گلخانه‌ای و آلودگی هوا پرداختیم. همچنین استفاده از حداقل ناوگان برای سرویس دهی به مشتریان برای کاهش هزینه‌های ثابت و دیگر هزینه‌های مرتبط با وسائط نقلیه در این مقاله مدنظر قرار گرفته است. علاوه بر این، سایر قیده‌های مسئله، شامل قیده‌های ظرفیت و زمان توزیع با هدف کمینه‌کردن هزینه حمل نیز مورد توجه قرار گرفت. سپس مدل ارائه شده توسط الگوریتم IPSO در ابعاد کوچک و بزرگ حل شد که نتایج ارائه شده، نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی دارد.

مراجع

- 1- Dantzig, G. and Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, 80-91.
- 2- Razmi, J. and Rahmanniya, F. (2013). 'Design of distribution network using hub location model with regard to capacity constraint and service level', *Int. J. Logistics Systems and Management*, Vol. 16, No. 4, PP.386–39
- 3- Palmer, A. (2007). The Development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles. *Ph.D. thesis, Cranfield University, School of Management*.
- 4- Maden, W., Eglese, R.W. and Black, D. (2010). Vehicle routing and scheduling with time varying data: a case study. *Journal of the Operational Research Society*, 61(3), 515–522.
- 5- Jabali, O., Van Woensel, T. and de Kok, A.G. (2009). Analysis of travel times and CO2 emissions in time-dependent vehicle routing. *Tech. rep., Eindhoven University of Technology*.
- 6- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. and da Grac, M. (2008). A case study of fuel savings through optimization of MSW transportation routes. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 19(4), 444–454.
- 7- Suzuki, Y. (2011). A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission, *Transportation Research Part D*, 16, 73–77.
- 8- Ombuki, B., Ross, B. J. and Hanshar, F. (2006). Multi-objective genetic algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*, 24:17–30.
- 9- Chen, A.L., Yang, G.K. and Wu, Z.M. (2006). Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem. *Journal of Zhejiang University Science*, 7(4):607-14.
- 10- Razmi, j., Haleh, H. and Ezzati, B. (2011). Solving the dynamic vehicle routing problem with AntNet algorithm. *Int. J. Logistics Systems and Management*, Vol. 26, No. , pp.65-70.
- 11- Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G. (1981). "Complexity of vehicle and scheduling problem." *Networks*, Vol.11, PP. 221-227.
- 12- Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P. (1979). The vehicle routing problem. In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., & Sandi, C. editors. *Combinatorial optimization*. Chichester, UK: Wiley. PP.315–38.
- 13- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39, 1419–1431.
- 14- Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, AF. And Gulsun, B. (2009). An approach for analysing transportation costs and a case study. *European Journal of Operational Research*, 193, 1–11.
- 15- Zhu, Q., Qian, L., Li, Y. and Zhu, S. (2006) An improved particle swarm optimization algorithm for vehicle routing problem with time windows, *IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vancouver, Canada*, 16-21, 1386–1390.
- 16- Tavakoli-Moghaddam, R., Norouzi, N., Salamatbakhsh, A. and Alinaghian, M. (2011). A vehicle routing problem considering a balance of goods based on the vehicles capacity by improved particle swarm optimization. *Journal of Transportation*, 8(4): 363-375.
- 17- Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995). "Particle swarm optimization." *IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*, PP.1942–1948.