

حل مساله مسیریابی وسایط نقلیه با در نظر گرفتن رضایت‌مندی مشتریان و

کاهش انرژی مصرفی با الگوریتم زنبور عسل

فرهاد صالحیان، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران

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

نرگس نوروزی، دانش آموخته دوره دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰

چکیده

این مقاله به ارائه مدل مساله مسیریابی وسایط نقلیه به منظور افزایش رضایت‌مندی مشتریان، کاهش مصرف انرژی و سوخت و کاهش هزینه‌های توزیع می‌پردازد. آمارها نشانگر آن است که هزینه سوخت، بخش قابل توجهی از هزینه حمل و نقل را دربر می‌گیرد. در نظر گرفتن عوامل زیست محیطی نه تنها بر هزینه‌های اقتصادی تاثیر می‌گذارد، بلکه بر انتخاب مسیرهای حمل و چگونگی توزیع بار بین ناوگان حمل و نقل نیز تاثیر گذار است. همچنین این مدل هزینه مدت زمان زودکرد و دیرکرد نسبت به موعد تحویل را با کمینه کردن مجموع این زمان‌ها کاهش می‌دهد. مساله مسیریابی وسایط نقلیه مورد بررسی از نوع مسایل NP-hard است، از همین رو به منظور حل این مدل پیشنهادی از الگوریتم زنبور عسل (BA) استفاده می‌شود و برای نشان دادن کارآیی الگوریتم طراحی شده جواب‌های به دست آمده با نرم افزار گمز مقایسه خواهند شد. همچنین به منظور حل مسایل در ابعاد بزرگ نتایج با جواب‌های حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) مقایسه و مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج نشان‌دهنده کارآیی الگوریتم پیشنهادی در حل مسایل را دارد.

واژه های کلیدی: مسیریابی وسایط نقلیه، کاهش مصرف سوخت، رضایت‌مندی مشتریان، الگوریتم زنبور عسل

۱. مقدمه

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 کارآیی عملیاتی ضروری می‌نماید.

از سوی دیگر، کاهش سوخت مصرفی مزایای بیشماری را به واسطه کاهش در انتشار گازهای گلخانه‌ای به کل جامعه و محیط زیست می‌رساند. برای مثال در ایالات متحده، انتشار گازهای گلخانه‌ای متصاعد توسط بخش حمل و نقل از ۲۴/۹٪ تا ۲۷/۳٪ بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ افزایش یافت که در این میان حمل و نقل جاده‌ای انتشار حدود ۷۸٪ از گازهای گلخانه‌ای را در میان دیگر حالت‌های حمل و نقل باعث می‌شود [Ohnishi, 2008]. همچنین توکلی مقدم و همکاران به بررسی حمل و نقل مواد سوختی تحت شرایط فازی پرداختند. مدل پیشنهادی در مسیرهای استان مازنداران مورد بررسی قرار گرفت [Tavakkoli Moghaddam et al. 2013]. هدف مدل تعیین بهتری مسیر برای انتقال مواد سوختی بر اساس دو معیار ریسک و هزینه بود.

بیشتر تحقیقات صورت گرفته، توجه به اهداف اقتصادی را از طریق کمینه کردن مسافت طی شده، زمان مورد نیاز یا تعداد وسائط نقلیه مورد نیاز و ... مدنظر قرار داده‌اند و از توجه به اهداف زیست محیطی غافل مانده‌اند. از این رو، پالمر [Palmer, 2007] مدلی یکپارچه در مسیریابی و انتشار آلاینده‌ها برای وسائط نقلیه ارائه کرد و نقش سرعت را در کاهش کربن دی اکسید تولید شده تحت سناریوهای مختلف ترافیکی و پنجره زمانی در نظر گرفت. میدن و همکاران [Maden, 2010] مساله VRP با محدودیت پنجره زمانی را که در آن سرعت به زمان سفر وابسته بود در نظر گرفتند. همچنین یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله پیشنهاد کردند و در نتایج خود به صرفه‌جویی ۷٪ در کربن دی اکسید تولید شده دست یافتند. مدل ارائه شده در یکی از شرکت‌های

مساله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP)، جزو دسته‌ای از مسائل است که با تعیین مجموعه‌ای از مسیرها در ارتباط است که در آن هر وسیله نقلیه از یک انبار مشخص شروع به حرکت کرده، به مجموعه‌ای از مشتریان معین خدمت دهی نموده و دوباره به همان انبار بر می‌گردد. این مساله اولین بار توسط دنتزیگ و رامسر ارائه گردید و براساس روشهای ریاضی به حل آن پرداخته شد [Dantzig and Ramser, 1959]. در ادامه کلارک و رایت الگوریتم صرفه جویی را برای حل VRP پیشنهاد دادند که منبای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت [Clarke, and Wright, 1994] و لاپورته و همکاران [Laport, Mercure, and Nobert, 1992] برای حل مسئله مسیریابی وسائط، رویکردهای گوناگونی همانند روش شاخه و حد را توسعه دادند. با پیشرفت‌های اخیر در حل این‌گونه مسایل و با در نظر گرفتن فرضیات و قیود پیچیده‌تر، روش‌های فراابتکاری همانند روش الگوریتم ژنتیک [Potvin and Bengio, 1994]، جستجوی ممنوع [Ho and Haugland, 2004]، سیستم بهینه‌سازی مورچگان [Reimann, Stummer and Doerner, 2002] شبیه‌سازی تبرید [Kuo, 2010] و الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بهبود یافته [Norouzi, Sadegh-Amalnick and Tavakkoli-Moghaddam, 2017] توسعه داده شده است.

آمارها نشانگر آن است که هزینه سوخت، بخش قابل توجهی از هزینه حمل و نقل را شامل می‌شود. برای مثال در یک شرکت حمل و نقل جاده‌ای در شانگهای چین هزینه سوخت در حدود ۶۷/۴۱٪ از هزینه کل حمل و نقل را در یک سال در بر می‌گیرد. رقمی معادل ۱/۵۵۰/۰۰۰ دلار که مقدار قابل توجهی است [Xiao et al. 2012]. در این شرایط اگر هزینه سوخت تنها ۵٪ کاهش یابد، تقریباً میزان ۷۵/۵۰۰ دلار و ۳٪ کل هزینه حمل و نقل در سال صرفه‌جویی در پی خواهد داشت. در مثال دیگر می‌توان به تحقیقات ساهین و همکاران [Sahin et al. 2009]

انتشار آلاینده را منجر می‌شود. پرادناس و همکاران [Pradenas, Oportus and Parada, 2013] به کمینه کردن انرژی مصرفی در VRP با حمل در بازگشت با در نظر گرفتن فاکتورهای بار، سرعت و فاصله پرداختند. تحقیقات نشان می‌دهد که هزینه حمل و نقل به فاکتورهای بسیاری وابسته است که می‌توانند به دو دسته کلی تقسیم‌بندی شوند. فاکتورهای دسته اول شامل فاصله، بار، سرعت، وضعیت جاده، نرخ مصرف سوخت (در هر واحد فاصله)، قیمت سوخت و غیره هستند که ارتباط مستقیمی با برنامه زمانبندی سفر دارند. فاکتورهای دسته دوم ارتباط غیرمستقیم با زمانبندی سفر دارند و شامل استهلاک وسیله نقلیه، نگهداری و تعمیرات، دستمزد رانندگان، مالیات و غیره می‌شوند [Xiao et al. 2012]. همان‌طور که مشخص است فاکتورهای 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 فاکتورهای 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، هنگامی که یک مسیر مشخص را با سرعت یکسان طی می‌کنند، کمتر از هزینه وسیله نقلیه با بار پر خواهد بود. با وجود گسترش انواع مختلف مسایل VRP بیشتر آن‌ها روی کمینه کردن هزینه توسط کاهش مسافت طی شده تمرکز کرده‌اند و نرخ مصرف سوخت به عنوان فاکتور تاثیرگذار در اغلب موارد نادیده انگاشته شده است.

در این مقاله، مدلی جدید در مساله مسیریابی وسایط نقلیه ارائه می‌شود به طوری که به حداکثر کردن رضایت مشتریان از طریق سرویس‌دهی به موقع در توزیع کالاها می‌پردازد و همچنین سوخت مصرفی در توزیع کالاها از طریق زمانبندی تحویل کالاها کمینه می‌شود که علاوه بر فراهم آوردن منافع اقتصادی، باعث کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، کربن دی اکسید و آلودگی هوا می‌گردد. از سوی دیگر، یکی دیگر از اهداف این

تحویل بار در جنوب غرب انگلستان به کار گرفته شد و کاهش ۷ درصدی انتشار گاز CO₂ را در برداشته است. کارا و همکارانش [Kara, Kara and Yetis, 2007] مدلی برای هر دو مورد جمع‌آوری و تحویل کالا برای VRP کلاسیک با هدف کمینه کردن انرژی ارائه کردند و آن را EMVRP نامیدند، به طوری که تابع بار وزن‌دار و نه فقط مسافت طی شده کمینه می‌گردد. در ادامه آن و راکا [Ahn and Rakha, 2008] به تاثیر انتخاب مسیر مناسب بر کاهش سوخت مصرفی و آلودگی هوا برای انواع مختلف وسایط نقلیه پرداختند و در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که انتخاب مسیرهای سریع‌تر همانند بزرگراه‌ها، همیشه منجر به کاهش عوامل ذکر شده نمی‌شود. در عوض بهبودهای قابل توجهی در کاهش انرژی مصرفی و آلودگی هوا هنگامی که رانندگان از مسیرهای کوتاه‌تر و کندتر استفاده می‌کنند، می‌تواند کسب شود؛ گرچه که این انتخاب می‌تواند منجر به افزایش در زمان سفر می‌شود.

در زمینه کاهش CO₂ اوکوهارت و همکاران [Urquhart, Scott and Hart, 2010] مساله فروشنده دوره‌گرد را برای پیدا کردن مسیرهایی که میزان گاز CO₂ را در پی دارند مطالعه کردند. در این تحقیق از مدل ارائه شده توسط بویر و همکاران [Bowyer, Akcelik and Biggs, 1985] استفاده شده و بر روی شش مجموعه داده تصادفی بین ۱۰ تا ۳۰ گره مشتری مدل اجرا شده است. اوبدا و همکاران [Ubeda, Arcelus and Faulin, 2011] چهار رویکرد متفاوت را با عنوان رویکرد اولیه، زمان بندی مساله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت گنجایش، مساله مسیریابی وسیله نقلیه با بارگیری در بازگشت، و مدل مساله مسیریابی وسیله نقلیه سبز برای مطالعه موردی شرکت حمل و نقل ایروسی در اسپانیا ارائه کردند. آنها از یک ماتریس انتشار که نشان‌دهنده میزان CO₂ انتشار یافته بین هر دو گره بود، استفاده کرده و به کمینه میزان مصرف سوخت در مدل پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق کاهش ۱۳/۰۶ درصدی در مسافت طی شده و کاهش ۱۳/۱۵ درصدی

پارامترها و متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل به صورت زیر بیان می‌گردند:

n	تعداد نقاط (مشتری‌ها) است و 0 نشان‌دهنده‌ی دپو است.
K	تعداد خودروهای در دسترس
q_i	تقاضای تحویلی به مشتری i
d_{ij}	فاصله میان گره i به j
t_{ij}^k	زمان مورد نیاز جهت طی مسیر (i, j) توسط وسیله نقلیه k
T	حداکثر زمان خدمت دهی جهت و زمان طی مسیر توسط وسیله نقلیه
C_k	ظرفیت وسیله نقلیه k
h_0	میزان سوخت مصرفی در واحد فاصله بدون بار
h_1	میزان اضافی سوخت مصرفی در واحد فاصله برای واحد بار
A_i	زمان رسیدن به مشتری i
B_i	زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i
s_i	مدت زمان سرویس‌دهی به مشتری i (ثانیه)
e_i	بازه پایینی پنجره زمانی مشتری i
l_i	بازه بالایی پنجره زمانی مشتری i
CE_{ik}	جریمه زودکرد در گره i توسط خودرو k
CL_{ik}	جریمه دیرکرد در گره i توسط خودرو k
x_{ijk}	اگر مسیر i به j توسط وسیله نقلیه v طی شود و در غیر اینصورت برابر 0 است.
w_{ij}^k	مقدار باری که خودرو k پس از ملاقات گره i به سمت گره j حمل می‌کند

مدل ریاضی VRP پیشنهادی، به صورت زیر است:

مدل آن است که مسیرها طوری طراحی شوند که هزینه حمل و نقل وسائط نقلیه حداقل گردد که در نهایت باعث کاهش هزینه‌های توزیع می‌گردد. این توابع هدف در یک مدل در پژوهش‌های پیشین مد نظر قرار نگرفته اند. ثابت شده است که مساله مسیریابی وسائط نقلیه یک مساله NP-Hard است [Lenstra and Rinnooy Kan, 1981] و استفاده از روش‌های دقیق در مورد مسایل با ابعاد به نسبت بزرگ نمی‌تواند توجیه‌پذیر باشد. به همین جهت، با افزایش ابعاد مساله بایستی از الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور حل مسایل استفاده شود. از این رو نوآوری دیگر مقاله استفاده از الگوریتم زنبور عسل (BA) به منظور حل مدل پیشنهادی است که در پژوهشهای پیشین مد نظر قرار نگرفته است. نتایج حاصل از BA با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) با مسایل نمونه موجود در ابیات موضوع مقایسه می‌شوند.

۲. تعریف مساله

مساله مسیریابی وسائط 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 متصل کننده 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 هزینه مسافرت بین دو نقطه j و i است. برای هر مشتری S_i یک تقاضای برداشتی $q_i \geq 0$ در نظر گرفته می‌شود که بایستی ارضاء گردد. به منظور بیان مدل پیشنهادی

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n CE_{ik} (B_i - A_i) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n CL_{ik} (B_i - l_i) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (h_0 + h_1 w_{ij}^k) d_{ij} x_{ijk} \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K h_0 d_{i0} x_{i0v} \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\sum_{i=0}^n x_{imk} - \sum_{j=1}^n x_{mik} = 0 \quad ; \quad m = 1, 2, \dots, n \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} \leq 1 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} \leq 1 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$$w_{ij}^k \leq ca_k x_{ijk} \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{0j}^k = \sum_{j=1}^n w_{ij}^k \sum_{i=0}^n x_{ijk} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$(w_{ji}^k - q_i - w_{ij}^k) x_{ijk} = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n s_i x_{ijk} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}^v x_{ijk} \leq TV \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

$$(A_j - B_i - s_i - t_{ij}) x_{ijk} = 0 \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{n+1\}, j \in N \setminus \{0\}, i \neq j \quad (10)$$

$$B_i = \max\{A_i, e_i\} \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (11)$$

$$B_i + s_i \leq l_i \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (12)$$

$$B_0 = s_0 = 0 \quad (13)$$

$$w_{ij}^k > 0, \quad A_i, B_i \geq 0, \quad x_{ijk} \in S, \quad x_{ijk} \in [0, 1] \quad (14)$$

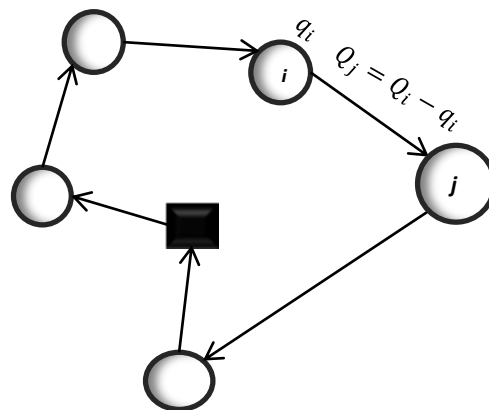
گرهی وارد شود، بایستی از آن خارج گردد و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار است. محدودیت ۴ و ۵ بیانگر آن است که تمامی وسایط نقلیه از دپو شروع به حرکت می‌کنند و در انتها به دپو بازمی‌گردند. محدودیت ۶ تا ۸ مربوط به محدودیت بار وسیله نقلیه است. محدودیت ۶ بیان می‌کند اگر $x_{ij} = 1$ میزان بار حمل شده به نقطه j از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نمی‌کند.

تابع هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل، نارضایتی مشتریان در تخطی از بازه تعیین شده برای سرویس‌دهی و هزینه‌های سوخت مصرفی توسط زمانبندی تحویل بموقع کالاهای سنگین‌تر می‌پردازد. همچنین محدودیت ۲ باعث می‌شود که هرگره تقاضا فقط از یک وسیله نقلیه توزیع کننده، خدمت دریافت کند. محدودیت ۳ بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای به

محدودیت ۷ بیان می‌کند که بار وسیله نقلیه هنگام ترک دپو برابر با مجموع تقاضای مشتریان بازدید شده خواهد بود. همچنین محدودیت ۸ میزان بار جدید وسیله نقلیه را بعد از بازدید مشتریان محاسبه می‌کند. این محدودیت بیان می‌کند که اگر $x_{ij} = 1$ باشد بار حمل شده به گره j (Q_j) برابر است با بار حمل شده به گره i (Q_i) منهای تقاضای گره i است. شکل ۱ نشان‌دهنده این موضوع است. محدودیت ۹ بیانگر آن است که زمان سرویس دهی و طی مسیرها باید از میزان مشخص شده کمتر باشد. همچنین محدودیت ۱۰ تا ۱۳ مربوط به اعمال محدودیت پنجره زمانی و محاسبه زمان انتظار در گره مشتری و انتخاب متناسب با زمان ترک گره است. در این حالت برای مشتری i فقط در یک بازه زمانی معین $[e_i, l_i]$ امکان سرویس دهی وجود دارد، به این بازه زمانی اصطلاحاً پنجره زمانی گفته می‌شود، به طوری که اگر وسیله نقلیه در این بازه در دسترس نباشد، برای مشتری هزینه های زیادی را ایجاد می‌کند. لحظه ترک وسایل نقلیه از ایستگاه مرکزی، زمان مسافرت بین هر دو نقطه تقاضا و یک زمان خدمت اضافی به ازای هر مشتری به عنوان زمان ورود وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شود. خدمت دهی به هر مشتری باید در پنجره زمانی مربوط به او آغاز گردد و وسیله نقلیه باید به مدت مشخصی در مکان مشتری i سرویس دهی نماید و در صورتی که وسیله نقلیه زودتر از پنجره زمانی مشتری در مکان حاضر شود مجاز است تا شروع پنجره زمانی او e_i منتظر بماند. محدودیت ۱۴ مربوط به متغیرهای مدل است.

۱. الگوریتم زنبور عسل

برای حل این مساله از الگوریتم زنبور عسل (BA) استفاده می‌شود که از رفتار طبیعی زنبورهای عسل برای پیدا کردن منابع



شکل ۱. ارتباط میان Q_j و Q_i

-
- مرحله ۱: تولید زنبورهای پیش‌تاز (جمعیت اولیه) با پاسخ‌های تصادفی
 - مرحله ۲: ارزیابی شایستگی پاسخ‌ها
 - مرحله ۳: تا زمانی که شرایط توقف ارضا نشده‌اند
 - // ایجاد جمعیت جدید
 - مرحله ۴: انتخاب مکان‌هایی برای جستجوی همسایگی‌ها
 - مرحله ۵: به کارگیری زنبورها برای جستجو و ارزیابی نقاط منتخب (اختصاص زنبورهای بیشتر برای بهترین مکان‌های بهتر)
 - مرحله ۶: انتخاب مناسب‌ترین زنبورها از هر قطعه زمین گل
 - مرحله ۷: تخصیص زنبورهای باقی‌مانده برای جستجوی تصادفی و ارزیابی عملکردشان
 - مرحله ۸: پایان.
-

شکل ۲. شبه کد الگوریتم زنبور عسل

انتخاب خواهد شد تا جمعیت زنبور عسل بعدی را تشکیل دهد. در طبیعت چنین محدودیتی وجود ندارد، این محدودیت در اینجا برای کاهش نقاط مورد کاوش قرار گرفته معرفی شده است. در مرحله ۷، زنبورهای باقی‌مانده در جمعیت به صورت تصادفی در اطراف فضای جستجو تخصیص می‌یابند تا برای راه‌حلهای بالقوه جدید، دیده‌وری کنند. این مراحل تا زمانی که یک معیار توقف ملاقات شود، تکرار می‌یابد. در انتهای هر تکرار، کلونی دو بخش در جمعیت جدید خود دارد؛ نمایندگانی از هر قطعه زمین انتخاب شده و سایر زنبورهای دیده‌وری که برای انجام جستجوهای تصادفی تخصیص می‌یابند. در ادامه پارامترهای الگوریتم زنبور عسل در جدول ۱ نشان داده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم زنبور عسل (BA) در جدول ۲ نشان داده شده است.

الگوریتم با npop زنبور پیش‌تاز که به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند شروع می‌شود. تابع شایستگی مکان‌هایی که توسط زنبورهای پیش‌تاز ملاقات می‌شوند، در مرحله ۲ ارزیابی می‌شود. در مرحله ۳ به تولید جمعیت جدیدی از زنبورهای پیشرو پرداخته می‌شود. در مرحله ۴ زنبورهایی که بالاترین شایستگی را دارند به عنوان زنبورهای منتخب انتخاب می‌شوند و مکان‌های ملاقات شده توسط آنها برای جستجوی همسایگی انتخاب می‌شوند. سپس، در مرحله‌های ۵ و ۶، الگوریتم جستجوها را در همسایگی‌های مکان‌های انتخاب شده هدایت می‌کند و زنبورهای بیشتری را نزدیک بهترین مکان‌های ne تخصیص می‌دهد. مقادیر شایستگی برای تعیین احتمال اینکه کدام زنبورها انتخاب خواهند شد استفاده می‌شوند. در مرحله ۶ برای هر قطعه زمین تنها زنبور عسلی با بالاترین شایستگی

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم زنبور عسل

<i>npop</i>	تعداد زنبورهای پیشتاز (تعداد اعضای جمعیت)
<i>ns</i>	تعداد مکانهای انتخاب شده از مکانهای بازدید شده
<i>ne</i>	تعداد بهترین مکان ها از مکانهای انتخاب شده
<i>bne</i>	تعداد زنبورهای تخصیص داده شده به مکانهای نخبه <i>ne</i>
<i>bns</i>	تعداد زنبورهای تخصیص داده شده برای سایر (ns-ne) مکان انتخاب شده
<i>ngh</i>	اندازه همسایگیها که شامل مکان و همسایه‌های آن می‌شود
<i>MaxIt</i>	معیار توقف الگوریتم

جدول ۲. مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم BA

<i>MaxIt</i>	<i>ngh</i>	<i>bns</i>	<i>bne</i>	<i>ne</i>	<i>ns</i>	<i>npop</i>
۱۰۰۰	۰/۱	۱۰	۲۰	۱۰	۳۰	۵۰

۳-۱ تولید جوابهای اولیه

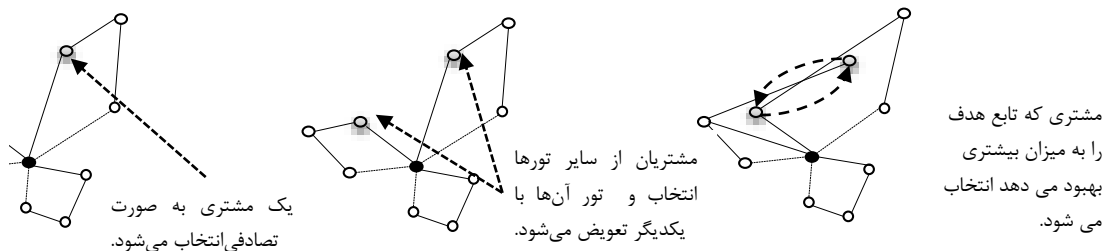
در این مقاله، به منظور ایجاد جواب های اولیه ابتدا یک رشته به اندازه n (تعداد گره) تعریف می‌شود. بخش i ام از این رشته بیانگر گره i ام است و مقدار صحیح داخل هر بخش نشان دهنده شماره وسیله نقلیه ای است که به آن گره سرویس می‌دهد. از این رو عددهای صحیح یکسان در بخشها بیانگر آن است که آن گره از وسیله نقلیه K خدمت می‌گیرد. سپس برای تعیین اولویت عبور وسائط نقلیه از گره‌ها به هر یک از اعداد صحیح بخشها بر اساس ترتیب عبوری وسیله نقلیه از گره عدد اعشاری اضافه می‌شود. به منظور اجرای این روش گام های زیر را اجرا نمایید:

۱. برای تمامی مشتریان $n, \dots, 1, i$ گام‌های زیر را اجرا نمایید.
۲. تمام ژن‌های رشته را با عدد تصادفی در بازه $[0, m+1-\epsilon]$ پر کنید.

تمامی مشتریان مشخص شده در هر وسیله نقلیه را بر اساس عدد اعشاری به طور صعودی مرتب کنید. ترتیب اولویت‌ها بیانگر ترتیب عبور وسیله نقلیه است.

۳-۲ جستجوی همسایگی

پس از ایجاد جواب‌های جدید، هر یک از جواب‌ها با استفاده از روش $2-opt$ بهبود یافتند. در این روش، یک گره (مشتری) از یک تور (مسیر) به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و جای آن با گره‌ها (مشتریان) در تورهای (مسیرهای) دیگر تعویض می‌شود. این عملگر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. روش $2-opt^*$

۲. نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور حل مدل پیشنهادی، دسته‌ای از مسائل نمونه توسط الگوریتم زنبور عسل پیشنهادی حل شده و جواب‌های حاصل با جواب‌های به دست آمده از حل مدل با الگوریتم PSO مقایسه می‌گردند. الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که توانمندی بسیار مناسبی در حل این نوع مسایل دارد [Poli, Kennedy and Blackwell, 2007; Kennedy and Eberhart, 1995] برای انجام این آزمایش‌ها از نرم افزار متلب استفاده شد و برای اجرای برنامه‌ها از کامپیوتر دو هسته‌ای با توانایی ۲/۳ GHZ و حافظه‌ی داخلی ۲ GB استفاده گردید. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی دو گروه مسأله یکی در ابعاد کوچک و دیگری در ابعاد بزرگ طراحی می‌شود. در گروه اول دسته‌ای از مسایل نمونه‌ی

کوچک توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل شده و جواب‌های حاصل با جواب‌های حاصل از حل مدل با نرم افزار گمز مقایسه می‌شوند. هدف از آزمایش اول بررسی توانایی روش پیشنهادی در رسیدن به جواب‌های بهینه است. در این مقاله از روش سعی و خطا به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شده است.

برای بررسی الگوریتم‌های مورد نظر تعداد ۸ مسأله با ابعاد کوچک تولید شد که مشخصات مسایل در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول ستون‌های اول و دوم به ترتیب شماره مسأله و تعداد مشتریان است. ستون سوم نشان دهنده‌ی تعداد وسیله نقلیه است. ستون‌های چهارم تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مسأله توسط لینگو است و ستون ششم تا نهم نشان‌دهنده‌ی مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مسأله توسط الگوریتم PSO هستند.

جدول ۳. نتایج محاسباتی مسایل با ابعاد کوچک

مسایل نمونه	تعداد مشتریان	تعداد وسایط نقلیه	حل توسط گمز			حل توسط BA		
			بهترین جواب	زمان (ثانیه)	خطا (%)	بهترین جواب	زمان (ثانیه)	خطا (%)
۱	۶	۲	۹۶/۲۳	۳۲	۰/۰۰	۹۶/۲۳	۱۱	۰/۰۰
۲	۷	۲	۱۱۰/۳۴	۹۳	۰/۰۰	۱۱۰/۳۴	۱۶	۰/۰۰
۳	۸	۳	۱۵۰/۲۳	۱۹۵	۰/۰۰	۱۵۰/۲۳	۲۸	۰/۰۰
۴	۸	۲	۲۲۰/۴۵	۳۴۳	۰/۰۰	۲۲۵/۴۵	۳۹	۲/۲۷
۵	۹	۳	۲۸۹/۲۳	۸۱۲	۰/۰۰	۲۹۱/۲۳	۵۵	۰/۶۹
۶	۱۰	۲	۳۴۰/۸۹	۱۴۵۱	۰/۰۰	۳۶۵/۸۹	۷۹	۷/۳۳
۷	۱۰	۳	۴۸۹/۶۵	۴۲۲۱	۰/۰۰	۳۱۵/۶۵	۱۰۱	۴/۹
۸	۱۱	۳	۵۵۰/۴۷	۴۷۶۵	۰/۰۰	۵۶۳/۴۷	۱۱۲	۲/۳۶
میانگین			۷۲۳/۱۴	۱۴۸۹	۰/۰۰	۳۷۸/۲۸	۵۵/۱۲	۵/۸۱

از مقایسه نتایج محاسباتی توسط الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات PSO با جواب‌های به دست آمده از گمز می‌توان مشاهده نمود که میانگین خطای نتایج محاسباتی توسط الگوریتم PSO با نتایج بدست آمده توسط نرم افزار گمز ۵/۸۱٪ است که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی است. همچنین زمان حل مسایل توسط گمز و PSO به ترتیب برابر ۱۴۸۹ و ۵۵/۱۲ است که نشان دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی به منظور حل مسایل در زمان کوتاه است.

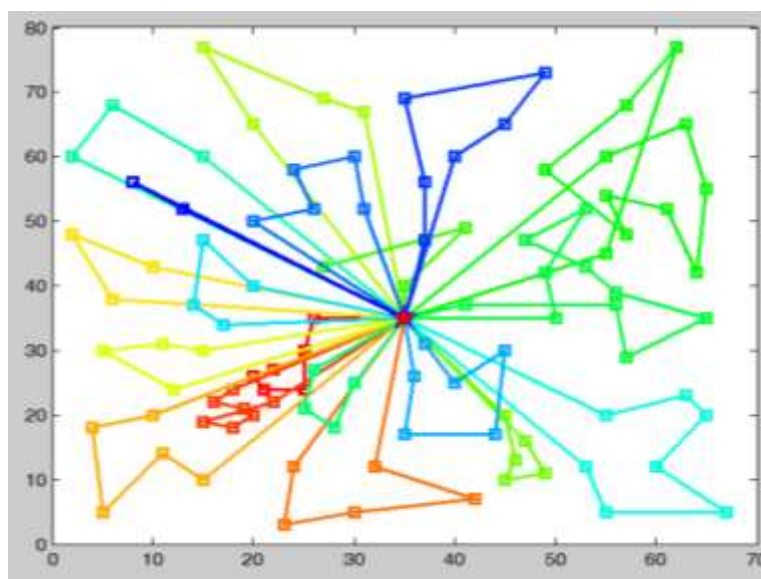
همچنین، به منظور بررسی قابلیت الگوریتم ارایه شده در ابعاد بزرگ از مجموعه تست‌های کریستوفیدز و الیون استفاده گردید. تعداد مسایل نمونه این دسته از مسایل ۱۵ عدد است تعداد مشتریان در این مسایل از ۱۳ تا ۱۰۱ مشتری در نظر گرفته شده و تعداد وسائل نقلیه بنا به مساله متفاوت است. همچنین نتایج محاسباتی در ابعاد بزرگ در جدول ۳ قابل مشاهده است. در این جدول ستون اول شماره مساله است، ستونهای دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده تعداد وسیله نقلیه و تعداد مشتریان است.

ستون چهارم الی ششم ستون‌های چهارم تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مساله توسط BA است و ستون ششم تا نهم به نشان‌دهنده مقدار بهینه، زمان حل و خطای محاسباتی حل مساله توسط PSO است. همانطور که از جدول ۴ مشخص است میانگین جواب‌ها برای BA و PSO به ترتیب برابر ۵۰۲۵/۱۵ و ۵۲۸۶/۸۳ است که می‌توان نتیجه گرفت که BA توانایی خوبی در حل مساله دارد. بیشترین خطای بدست آمده توسط BA مربوط به نمونه مساله ۳ با مقدار ۳/۷۴ درصد است که شکل مسیریابی شده‌ی آن که توسط الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین زمان حل نمونه مسایل توسط BA و PSO به ترتیب برابر ۱۸۹۸/۴۳ و ۱۳۷۰/۰۵ ثانیه است که نشان دهنده کارایی محاسباتی مناسب‌تر BA نسبت به PSO است. همچنین روند بهبود در حل مساله توسط الگوریتم BA در مساله ۱۴ در شکل ۵ نشان داده شده است.

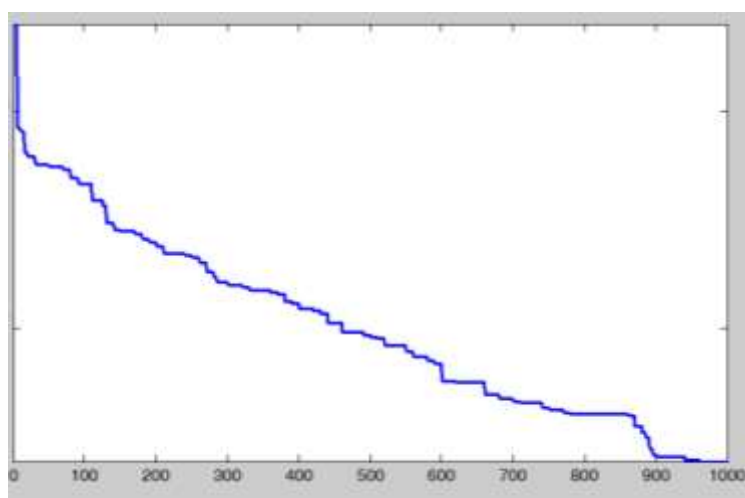
جدول ۴. نتایج محاسباتی مسایل با ابعاد بزرگ

مسایل نمونه	تعداد مشتریان	تعداد وسائل نقلیه	حل توسط BA			حل توسط PSO		
			بهترین جواب	زمان (ثانیه)	خطا (%)	بهترین جواب	زمان (ثانیه)	خطا (%)
۱	۱۳	۴	۱۱۰۳/۸۹	۳۳۳/۴۷	۰/۷۴	۱۰۹۵/۶۵	۲۴۰/۶۱	۰/۰۰
۲	۲۲	۴	۲۵۸۶/۷۲	۸۰۵/۸۴	۰/۰۰	۲۶۴۹/۹۷	۵۸۲/۲۶	۲/۴۴
۳	۲۳	۳	۳۹۰۰/۹۹	۱۴۰/۱۳۰	۳/۷۴	۳۷۴۵/۷۳	۹۴۷/۲۴	۰/۰۰
۴	۳۰	۳	۴۱۹۷/۹۱	۱۹۰/۷۲۸	۳/۳۸	۴۰۵۵/۶۴	۱۲۹۸/۲۹	۰/۰۰
۵	۳۰	۴	۱۳۱۷/۶۵	۲۱۷۳/۵۵	۰/۰۰	۱۴۰۳/۲۲	۱۵۵۲/۴۳	۶/۴۹
۶	۳۱	۷	۶۰۶۷/۹۱	۳۲۲۴/۸۰	۰/۰۰	۶۷۷۳/۷۴	۲۱۲۱/۵۷	۱۱/۶۳
۷	۳۳	۴	۳۸۲۵/۹۰	۷۲۰/۹۷	۰/۱۸	۳۸۱۸/۹۸	۵۵۶/۱۳	۰/۰۰
۸	۵۱	۵	۳۵۹۳/۳۵	۱۸۶۳/۶۰	۰/۰۰	۳۷۱۹/۳۳	۱۱۴۹/۹۷	۳/۵۰
۹	۷۶	۷	۷۱۳۰/۶۳	۲۸۶۹/۹۸	۰/۰۰	۷۶۴۷/۳۴	۱۶۴۷/۲۶	۷/۲۴
۱۰	۷۶	۸	۶۶۱۱/۶۶	۳۶۹۸/۵۱	۰/۰۰	۶۸۸۴/۳۲	۱۵۵۰/۲۲	۷/۳۷
۱۱	۷۶	۱۰	۶۶۶۵/۳۴	۱۷۸۰/۳۳	۰/۰۰	۷۱۱۰/۱۲	۱۷۰۳/۳۳	۶/۶۷

۲/۷۷	۱۷۲۱/۳۳	۷۱۲۰/۴۵	۰/۰۰	۱۸۶۶/۵۶	۶۹۲۸/۲۳	۱۴	۷۶	۱۲
۴/۲۴	۱۸۰۱/۵۶	۷۳۹۹/۲۶	۰/۰۰	۱۹۰۵/۴۸	۷۰۹۸/۱۲	۱۵	۷۶	۱۳
۹/۰۲	۱۸۴۵/۴۸	۷۸۹۳/۵۴	۰/۰۰	۱۸۸۵/۱۲	۷۲۳۹/۸۹	۸	۱۰۰	۱۴
۹/۱۲	۱۸۳۳/۱۲	۷۹۷۶/۲۳	۰/۰۰	۱۹۵۹/۷۸	۷۳۰۹/۱۲	۱۴	۱۰۱	۱۵
۴/۷۱	۱۳۷۰/۰۵	۵۲۸۶/۸۳	۰/۵۳	۱۸۹۸/۴۳	۵۰۲۵/۱۵	میانگین		



شکل ۴. مسیر یابی انجام شده توسط الگوریتم BA برای نمونه مساله ۱۴



شکل ۵. روند بهبود در حل مساله توسط الگوریتم BA در مساله ۱۴

۳. نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی جدید در مساله مسیریابی وسایل نقلیه به منظور حداکثر کردن رضایت مشتریان از طریق سرویس دهی بموقع در توزیع کالاها و همچنین حداقل کردن هزینه های توزیع از طریق طراحی مسیرها ارائه شد. هدف کمینه کردن سوخت مصرفی علاوه بر فراهم آوردن منافع اقتصادی، باعث کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه ای، کربن دی اکسید و آلودگی هوا است. از طرفی به دنبال آن است که با زمانبندی مناسب برای توزیع کالاها، حداکثر رضایت مشتریان را کسب نماید. از سوی دیگر، یکی دیگر از اهداف این مساله آن است که مسیرها طوری طراحی گردند که هزینه حمل و نقل وسائط نقلیه، به حداقل میزان خود برسد. که در نهایت باعث کاهش هزینه ها می گردد. مدل پیشنهادی توسط الگوریتم زنبور عسل حل شد و جواب های حاصل با الگوریتم PSO مقایسه شد. نتایج نشانگر آن است که کیفیت جواب های حاصل از الگوریتم BA مناسب تر از کیفیت جواب های الگوریتم PSO است همچنین زمان پیچیدگی محاسباتی و پیچیدگی حل PSO از BA بهتر بوده است. همچنین همگرایی الگوریتم زنبور عسل مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات آتی می تواند به مقایسه نتایج الگوریتم زنبور عسل با دیگر روشها بپردازد. همچنین توسعه روشهای حل دقیق می تواند مورد توجه قرار گیرد.

۴. مراجع

- Banks, A., Vincent, J. and Anyakoha, C. (2008) "A review of particle swarm optimization. Part II: Hybridization, combinatorial, multi-criteria and constrained optimization, and indicative applications", *Natural Computing*, Vol. 7, No. 1, pp. 109–124.
- Bowyer, D. P., Akcelik, R. and Biggs, D. C. (1985) "Guide to fuel consumption analysis for urban traffic management", Australian Road Research Board Transport Research.
- Clarke, C. and Wright, J. Q. (1994) "Scheduling of vehicle from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 568-581
- Dantzig, G. and Ramser, J. H. (1959) "The truck dispatching problem", *Management Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 80-91.
- Ho, S. C. and Haugland, D. (2004) "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries", *Computers and Operations Research*, Vol. 31, No. 12, pp.1947–1964.
- Kara, I., Kara, B.Y. and Yetis, M. K. (2007) "Energy minimizing vehicle routing problem", In: A. Dress, Y. Xu, and B. Zhu (Eds.), *Combinatorial Optimization and Applications*, Lecture Notes in Computer Science, (4616, pp. 62–71). Berlin/Heidelberg: Springer.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995) "Particle swarm optimization", *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, pp.1942–1948.
- Kuo, Y. (2010) "Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 157–165.
- Laport, G., Mercure, H. and Nobert, Y. (1992) "A branch and bound algorithm for a class of asymmetrical vehicle routing problems", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 43, No. 5, pp. 469-481
- Ahn, K. and Rakha, H. (2008) "The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions". *Transportation Research: Part D*, Vol. 13, No. 3, pp.151–167.
- توکلی مقدم ، رضا، محمود سلطانی، فرزاد و محمودآبادی، عباس (۱۳۹۲) "توسعه مدل ریاضی مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد سوختی تحت شرایط فازی - مطالعه موردی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۲۰۹-۲۲۰.

- Potvin, J. Y. and Bengio, S. (1994) "A genetic approach to the vehicle routing problem with time windows", publication CRT-953, Centre de Recherche sur les Transports, University of Montreal.
- Pradenas, L., Oportus, B. and Parada, V. (2013) "Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 8, pp. 2985–2991.
- Reimann, M., Stummer, M. and Doerner, K. (2002) "A savings based ant system for the vehicle routing problem", W.B. Langdon, et al. (Eds.) Kaufmann, M. (GECCO 2002) *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, San Francisco.
- Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A. F. and Gulsun, B. (2009) "An approach for analysing transportation costs and a case study", *European Journal of Operational Research*, Vol. 193, No. 1, pp. 1–11.
- Ubeda S., Arcelus, F. J. and Faulin, J. (2011) "Green logistics at Eroski: A case study", *International Journal of Production Economics*, Vol. 13, No. 1, pp. 44–51.
- Urquhart, N., Scott, C. and Hart, E. (2010) "Using an evolutionary algorithm to discover low CO tours within a travelling salesman problem", *Proceedings of the 2010 International Conference on Applications of Evolutionary Computation*, pp. 421–430
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y. (2012) "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 7, 1419–1431.
- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A.H.G. (1981) "Complexity of vehicle and scheduling problem", *Networks*, Vol.11, No. 2, pp. 221-227.
- 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*, Vol. 61, No. 3, pp. 515–522.
- Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017) "Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle routing problem: minimizing fuel consumption", *Optimization Letters*, Vol. 11, No. 1, pp.121-134.
- Ohnishi, H. (2008) "Greenhouse gas reduction strategies in the transport sector: Preliminary Report", Tech. Rep., OECD/ITF Joint Transport Research Centre Working Group on GHG Reduction Strategies in the Transport Sector, OECD/ITF, Paris. <<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/08GHG.pdf>> (accessed 11.02.11).
- Palmer, A. (2007) "The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles", Ph.D. Dissertation, Cranfield University, School of Management.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M. (2005) "The bees algorithm", Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK.
- Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M. (2006) "The bees algorithm - A novel tool for complex optimization problems", *Proceedings of IPROM, Conference*, pp. 454-461.
- Poli, R., Kennedy, J. and Blackwell, T. (2007) "Particle swarm optimization, An overview", *Swarm Intelligence*. Vol. 1, No. 1, pp. 33–57.

فرهاد صالحیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد قائم شهر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برنامه‌ریزی حمل و نقل را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب اخذ نمود. همچنین ایشان در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه تهران - پردیس البرز است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی حمل و نقل، ارزیابی زنجیره‌های تامین و مدیریت ریسک است.



رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن - استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوئین‌برن - 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.

