فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۲، ص. ۳۵۲۶-۳۵۰۹

مقاله علمی-پژوهشی

مسیریابی وسایل نقلیه حمل کالا با قابلیت در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و هزینه ثابت بکارگیری ناوگان

محسن بابائی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

E-mail: m.babaei@basu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

چکیده

صورت کلاسیک مسأله «مسیریابی وسیله نقلیه»[1] هزینه حمل‌ونقل را مربوط به کمان‌های شبکه می‌داند، در صورتی که هزینه‌های اولیه (ثابت) بکارگیری وسیله نقلیه و استخدام راننده جزءِ هزینه‌های اصلی حمل‌ونقل کالا به حساب می‌آیند. در این مقاله، مدلی برای مسأله «مسیریابی وسیله نقلیه» ارائه شده است، که در آن هزینه‌های اولیه بکارگیری وسیله به صورت مجزا و در کنار سایر هزینه‌ها کمینه می‌گردد. این مسأله یک مسأله با «پیچیدگی بالا»[2] به حساب می‌آید، و نمی‌توان آن را در شبکه‌های درون‌شهری بزرگ به صورت دقیق و در مرتبه زمانی چندجمله‌ای حل کرد. بنابراین، برای حل مدل پیشنهادشده از الگوریتم «بهینه‌سازی اجتماع مورچگان»[3] استفاده شده است. الگوریتم‌های قبلی بهینه‌سازی اجتماع مورچگان که برای حل مسیریابی وسیله نقلیه ارائه‌شده‌اند، قادر به در نظر گرفتن هزینه‌های اولیه بکارگیری وسیله به عنوان یک عامل هزینه در تابع هدف نیستند. یکی از نوآوری‌های این مقاله به اصلاح این الگوریتم برای منظور کردن هزینه‌های اولیه بکارگیری وسیله معطوف شده است. برای ارزیابی توان مدل پیشنهادشده، شبکه شهر مشهد با ۲۵۳ ناحیه ترافیکی و یک دپو در منطقه مرکزی شهر، برای بکارگیری مدل روی شبکه واقعی انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش حل ارائه شده با سرعت قابل قبول (با زمانی کمتر از ۲ ثانیه) به نتایج تقریبی مطلوب همگرا می‌شود. این در حالی است که حل مدل مذکور با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری موجود ممکن نیست.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت-محدودیت، بهینه‌سازی اجتماع مورچگان، شبکه‌های بزرگ

۱. مقدمه

مسأله «مسیریابی وسیله نقلیه» یکی از مسائل پایه‌ای برای مدیریت بهینه حمل‌ونقل، و مخصوصاً حمل‌ونقل کالا به حساب می‌آید (Golden et al., 2008). شکل کلاسیک این مسأله، به دنبال تعیین مجموعه‌ای از مسیرها برای خدمت‌رسانی به مشتریان توسط تعدادی وسائل نقلیه است، به گونه‌ای که کمترین هزینه حمل‌ونقل را به همراه داشته باشد (Laporte et al., 1985). واضح است که در زنجیره تولید تا مصرف کالا ذینفعان زیادی دخیل هستند. تولیدکننده، توزیع‌کننده، راننده، تحویل‌گیرنده و مسوول بهره‌برداری و قانون‌گذاری شبکه معابر، هر یک به نوبه خود منافع و هزینه‌هایی دارند که ویژگی‌های حمل‌ونقل کالا می‌تواند متأثر از هر یک از آنها باشد. لیکن، برای آن که مسأله را بتوان به شکل علمی و ابزار موجود تحلیل کرد، صرف‌نظر کردن از برخی پارامترها (به طور مستقیم) امری ضروری است. به همین دلیل، در شکل کلاسیک مسأله مسیریابی وسیله نقلیه، ارکان اصلی مسأله را مشتریان، وسایل نقلیه و دپو تشکیل می‌دهند. مشتری (تحویل گیرنده کالا) به متقاضی دریافت کالا یا خدمات اطلاق می‌شود و در قالب مجموعه‌ای از نقاط با تقاضای مشخص بیان می‌شود. این نقاط باید توسط گروهی از وسائل نقلیه خدمت‌دهی شوند، که این وسایل نقلیه، سفرشان را از دپو شروع کرده و با خدمت‌رسانی به مجموعه‌ای از مشتریان نهایتاً به دپو باز می‌گردند. مراکز اعزام و بازگشت وسائل نقلیه را اصطلاحاً دپو می‌نامند. بدین ترتیب، می‌توان گفت که ذینفعان اصلی مسأله مسیریابی وسیله نقلیه را اجزای زنجیره توزیع تشکیل می‌دهند و بنابراین، کاهش هزینه-های توزیع کالا هدف اصلی این مسأله است.

هزینه‌های حمل و نقل کالا از مراکز توزیع کالا تا مشتریان را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد (Taş et al., 2013):

الف) هزینه اولیه تأمین ناوگان مورد نیاز و استخدام راننده

ب) هزینه‌های وابسته به زمان (یا مسافت) پیموده‌شده کار

مورد (الف) به تعداد وسایل نقلیه وابسته است و مورد (ب) به میزان زمان کاری وسایل نقلیه است که نماینده‌ای برای میزان استهلاک وسایل نقلیه، مصرف سوخت، و ساعات اضافه‌کاری رانندگان است. در برخی مطالعات به هزینه‌های زیست–محیطی حمل و نقل کالا نیز پرداخته شده است (Niu et al., 2018) که می‌توان آنها را به نوعی مرتبط با زمان سفر دانست.

هرگاه تعداد وسایل نقلیه از پیش معلوم و غیر قابل تغییر (ورودی مسأله) باشد، هدف از مسأله مسیریابی تعیین مشتریانی خواهد بود که می‌بایست به هر وسیله نقلیه تخصیص داده شوند تا هزینه‌های وابسته به زمان (یا مسافت) پیموده‌شده در شبکه به حداقل ممکن برسد. در واقع، در این حالت عامل اصلی هزینه مورد (ب) خواهد بود. در این حالت، که موضوع مسأله مسیریابی وسیله نقلیه کلاسیک در پیشینه موضوع بوده است (Cordeau et al., 2007)، هر یک از وسایل نقلیه با خدمت-رسانی به مجموعه‌ای از نقاط –به گونه‌ای که حجم تبادل کالا با آن نقاط از ظرفیت آن فزونی نیابد– مجدداً به دپو باز می‌گردد و بدین ترتیب امکان بازگشت وسیله نقلیه قبل از پرشدن کامل فراهم نخواهد آمد. این موضوع می‌تواند زمان کاری نامتعادل بین وسایل نقلیه (یا رانندگان) به‌کارگرفته شده گردد. به این معنی که هر وسیله تنها به تعدادی مشتری خدمت می‌دهد که تقاضای آن‌ها بیشتر از ظرفیت وسیله نباشد تا بدین ترتیب هزینه بکارگیری ناوگان به حداقل ممکن برسد. از سوی دیگر، باید توجه داشت که چنین فرضی ممکن است باعث افزایش زمان رسیدن به مشتری‌ها شود. احتمال بروز این مشکل در شهرهای بزرگ با تعداد زیاد مشتریان و حجم اندک کالا بسیار محتمل است (Rajabi-Bahaabadi et al., 2021).

به همین دلیل، مقاله حاضر به دنبال ارائه مدلی است که مجموع هزینه‌های نوع (الف) و (ب) را به حداقل مقدار خود برساند، تا امکان ارزیابی استفاده از وسایل نقلیه بیشتر –به گونه‌ای که پر شدن آنها برای بازگشت به دپو پیش‌فرض مسأله نباشد– به

مسأله اضافه شود. این موضوع نوآوری اصلی این مطالعه به حساب می‌آید. از طرف دیگر، از آنجا که مسأله مورد نظر می-بایست قابلیت بکارگیری در شهرهای بزرگ را نیز داشته باشد، دومین نوآوری این مطالعه به این موضوع معطوف شده است. برای این منظور، از الگوریتم «بهینه‌سازی اجتماع مورچگان» که یک روش حل قوی در این زمینه شناخته می‌شود (Wu et al. , 2021; Jia et al., 2021; Huang et al., 2022; and Leite et al., 2022)، استفاده شده است. الگوریتم مورچگان از دو جنبه زیر در مسأله مسیریابی کاربرد زیادی داشته است: (۱) توان بالای آن در تولید مسیرها از مبدأ به مقصد مشخص و (۲) سهولت ارضاء محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه حین تولید مسیرها (Babaei and Rajabi-Bahaabadi, 2019). اجتماعتفاوت اصلی الگوریتم حل در این مقاله با الگوریتم‌های مشابه قبلی به نوع تابع هدف مدل پیشنهادشده برمی‌گردد. توضیح بیشتر این که در تابع هدف مدل پیشنهادشده هزینه بکارگیری وسایل نقلیه را نیز در کنار سایر هزینه‌های حمل‌ونقل باید کمینه شود، و بنابراین روش حل مذکور توانایی تولید حل‌های مختلف با بکارگیری تعداد مختلف از وسایل نقلیه را داشته باشد. بنابراین، تغییر در الگوریتم مورچگان برای در نظر گرفتن این ویژگی یکی از نوآوری‌های این مقاله به شمار می‌آید.

۲. ادبیات پژوهش

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه اولین بار توسط دانتزیگ و رامسر (Dantzig and Ramser, 1959) ارائه شد. در ادبیات موضوع، مسأله مسیریابی وسیله نقلیه به صورت یک مسأله بهینه‌سازی مطرح می‌شود و معمولاً در قالب مدل‌های «برنامه-ریزی ریاضی»[۴] بیان می‌شود. چنین مسائلی شامل یک یا چند تابع هدف و مجموعه‌ای از محدودیت‌ها است (Zhao et al. , 2019). برای مدلسازی مسأله مسیریابی وسیله نقلیه رویکردهای مختلفی وجود داشته است که با توجه به شرایط شبکه و نوع بهره‌برداری سیستم توزیع متفاوت خواهد بود. اما آنچه در همه مدل‌ها (فرمول‌بندی‌ها) به صورت یک امری مشترک وجود داشته است، در نظر گرفتن یک گراف به عنوان شبکه حمل‌ونقل است که مشتریان و دپو گره (رأس)های آن و راه‌های اتصال بین این گره‌ها یال (کمان)های آن را تشکیل می-دهند.

یکی از فرمول‌بندی‌های با تعداد ارجاع بالا مربوط به لاپورته و همکاران (Laporte et al., 1985) است، که فرمول‌بندی مسأله را روی یک «گراف غیرجهت‌دار»[۵] ارائه کردند. در چنین گرافی تفاوتی بین هزینه سفر در جهات رفت و برگشت وجود نخواهد داشت؛ یعنی تنها مسافت سفر مهم خواهد بود، و بنابراین اگر زمان سفر در جهات رفت و برگشت (مخصوصاً در ساعات اوج ترافیک) متفاوت باشد، از چنین مدلی نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین، محققان دیگری از گراف جهت‌دار استفاده کرده‌اند، و مرور ادبیات مربوطه را می‌توان در کتاب و مقالات مختلف (مانند مراجع Laporte, 1992; Cordeau et al., 2007) یافت. در مقاله حاضر، از گراف جهت‌دار برای فرمول-بندی مدل استفاده می‌شود، تا از این طریق بتوان تراکم ترافیکی در ساعات اوج را در دو جهت معابر به صورت واقع‌گرایانه و مجزا در نظر گرفت. همچنین، در شبکه‌های واقعی برخی از معابر تنها به صورت یکطرفه عمل می‌کنند و نمی‌توان فرض کرد که جهت‌دار نباشند.

مسأله مسیریابی وسیله نقلیه یکی از مسائل «بهینه‌سازی ترکیباتی»[۶] است با «پیچیدگی محاسباتی بالا» است و روش حل دقیقی با مرتبه زمانی چند جمله‌ای برای آن وجود ندارد (Eksioglu et al. , 2009). بدین معنی که زمان حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه با افزایش تعداد گره‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد. روش‌های حل دقیق بر پایه مفاهیم تحقیق در عملیات هستند و حل‌های بهینه قطعی را به دست می‌دهند. اما، از آن جا که با بزرگ شدن اندازه مسأله (زیاد شدن تعداد گره-ها)، روشهای دقیق قادر به تعیین حل بهینه در زمان قابل قبول نیستند. تعداد این الگوریتم ها و تنوع آنها نسبت به روش‌های تقریبی (ابتکاری و فرا–ابتکاری)، مخصوصاً در دو دهه اخیر،

کمتر است. برای اطلاع در مورد انواع روش‌های دقیق مسأله مسیریابی وسیله نقلیه می‌توان به مرجع (Laporte, 1992) رجوع کرد. روش‌های تقریبی خود به دو دسته «ابتکاری کلاسیک»[۷] و «فرا-ابتکاری»[۸] تقسیم‌بندی می‌شوند (Cordeau et al., 2007). این الگوریتم‌ها، حل‌های «نزدیک به حل بهینه»[۹] یا «بهینه محلی»[۱۰] را در یک زمان قابل قبول ارائه می‌دهند. تنوع این الگوریتم‌ها به قدری زیاد است که در مورد آن کتاب یا فصولی از کتاب در مبحث تحقیق در عملیات نوشته شده است. برای اطلاع در مورد انواع روش‌های دقیق مسأله مسیریابی وسیله نقلیه می‌توان به کارهای جندرو و همکاران (Gendreau et al., 2008)، گلدن و همکاران (Golden et al., 2008)، ویدال و همکاران (Vidal et al., 2020)، و الشائر و اواد (Elshaer and Awad, 2020) رجوع کرد. در دو دهه اخیر الگوریتم‌های فرا-ابتکاری بسیار زیادی ارائه شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک[۱۱] (Potvin et al., 1996)، الگوریتم شبیه-سازی تبرید[۱۲] (Osman, 1993)، الگوریتم جستجوی ممنوعه[۱۳] (Gendreau et al., 1994)، اجتماع مورچه‌ها (Bullnheimer et al., 1997)، بهینه‌سازی گروه ذرات[۱۴] (Marinakis et al., 2010) و الگوریتم زنبور عسل[۱۵] (Marinakis et al., 2008) اشاره کرد. هر یک از این الگوریتم‌ها –که نمونه‌ای از مراجع مربوط به آنها ارائه شد– مکرراً به تنهایی و یا به صورت ترکیبی برای حل انواع مسائل مسیریابی وسیله نقلیه استفاده شده‌اند.

در میان الگوریتم‌های فرا-ابتکاری، الگوریتم اجتماع مورچه‌ها با توجه به ماهیت آن –که به شبیه‌سازی نحوه مسیریابی مورچگان می‌پردازد– و کارآیی بالای آن در حل مسائل مسیریابی، مد نظر بسیاری از محققان بوده است. برای مثال، مراجع (Mutar et al., 2020; Xiang et al., 2020; Guo et al., 2020) تنها نمونه‌ای از مطالعاتی است که اخیراً از الگوریتم مورچگان ویا ترکیبی از آن با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری را برای حل انواع مختلف مسأله مسیریابی وسیله نقلیه به کار گرفته‌اند. در مطالعه حاضر نیز، از الگوریتم اجتماع مورچگان برای حل مدل پیشنهادی استفاده خواهد شد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱ توضیح مسأله

در این مقاله، هدف مسأله مسیریابی وسیله نقلیه به حداقل رساندن هزینه بکارگیری وسایل نقلیه (به عنوان مهم‌ترین عامل هزینه از دید توزیع‌کننده) به همراه سایر هزینه‌های حمل‌ونقل است. در این مسأله، تعیین مجموعه مسیرهای بهینه می‌بایست به گونه‌ای صورت پذیرد که: اولاً، هر مشتری دقیقاً یک بار ملاقات شود. ثانیاً، هر وسیله نقلیه از دپو شروع به حرکت کند و در پایان خدمت رسانی به دپو باز گردد. ثالثاً، تقاضای کل مشتریان ملاقات‌شده توسط یک وسیله نقلیه از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نکند.

از دید شرکت توزیع‌کننده (ارائه‌دهنده خدمت)، هزینه حمل‌ونقل، شامل هزینه ثابت بکارگیری وسیله نقلیه، سوخت، استهلاک و ساعاتی از روز است که راننده مشغول کار است. بدیهی است که هزینه‌های سوخت، استهلاک و ساعات کاری رانندگان را می‌توان بر حسب زمان بیان کرد. بنابراین، می‌توان هزینه را به دو جزء تقسیم کرد: ۱) هزینه ثابت خرید یا اجاره هر وسیله نقلیه، و ۲) هزینه سوخت و استهلاک وسایل نقلیه بعلاوه هرینه ساعات کاری رانندگان. در مورد دوم می‌توان زمان سفر کل تجربه‌شده روی شبکه را با ضریبی مشخص به هزینه تبدیل کرد. به همین دلیل، زمان سفر روی شبکه معابر شهر اهمیت زیادی خواهند داشت، و باید با توجه به دوره تحلیل (ساعت اوج یا غیراوج) به صورت جهت‌دار مدل گردد. اطلاع از این زمان سفرها نیازمند بکارگیری مدل‌های تقاضای سفر است که در این مقاله مجال توضیح آنها نیست. در این مطالعات، مدل‌های ترافیکی به عنوان یک فرآیند پیشین ورودی‌های اصلی مدل مسیریابی وسیله نقلیه را –که همان زمان سفر کمان‌های

شبکه هستند- تولید می‌کنند. جدول (۱) فهرستی از تعاریف و علائم مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد.

جدول ۲. تعاریف و علائم مورد استفاده در فرمول‌بندی مدل و الگوریتم حل

علامت		تعریف
G	:	گراف جهت دار برای نمایش شبکه
I	:	مجموعه گره‌های گراف G
E	:	مجموعه کمان‌های گراف G
N	:	مجموعه نقاط تقاضا
n	:	تعداد گره‌های شبکه
V	:	مجموعه وسایل نقلیه
Q	:	ظرفیت هر وسیله نقلیه
q_i	:	تقاضای گره i
$\delta^+(i)$	:	مجموعه کمان‌های ورودی به گره i
$\delta^-(i)$	:	مجموعه کمان‌های خروجی از گره i
z_v	:	متغیر تصمیم مسأله برای انتخاب وسایل نقلیه
x_{ij}^v	:	متغیر تصمیم مسأله برای انتخاب کمان‌ها توسط وسایل نقلیه
t_{ij}	:	زمان سفر روی کمان‌ها
M	:	یک عدد مثبت بزرگ
VOT	:	ارزش پولی زمان سفر
c	:	هزینه بکارگیری هر وسیله نقلیه (با راننده)
m	:	تعداد مورچگان در الگوریتم حل
TRD	:	مجموع تقاضای پاسخ‌داده‌نشده در هر مرحله از الگوریتم حل
TRC	:	مجموع ظرفیت باقی‌مانده در هر مرحله از الگوریتم حل
ξ ،χ و θ	:	اعداد تصادفی یکنواخت در بازه (۰ و ۱)
ζ	:	پارامتری کالیبراسیون الگوریتم پیشنهادی
φ ،β و γ_0	:	پارامترهای کالیبراسیون مرسوم ACO

۳-۲ فرمول‌بندی مدل

فرض کنید $G=(I,E)$ بیان‌گر یک گراف جهت‌دار باشد که $|I|=n+2$. مجموعه مشتری‌ها با N نمایش داده می‌شود و تعداد کل مشتری‌ها (نقاط تقاضا) $|N|=n$ است. N مجموعه I غیر از 0 و $n+1$ (یعنی $I\setminus\{0,n+1\}$) را شامل می‌شود. 0 و $n+1$ نشان‌دهنده نقطه دپو هستند که به ترتیب برای شروع و خاتمه مسیرها استفاده می‌شوند. E مجموعه کمان‌ها را نشان می‌دهد و برابر است با $\{(i,j)\,|\,i,j\in I, i\neq j\}$. مجموعه وسایل نقلیه با V نشان داده می‌شود که همه وسیله نقلیه دارای ظرفیت Q هستند. هر نقطه تقاضای $i\in N$ تقاضایی مثبت و برابر با q_i دارد، که از Q کمتر است. برای آن که بتوان امتداد مسیرها را در ورود به و خروج از نقاط مختلف شبکه مدل‌سازی کرد از دو مجموعه $\delta^+(i)$ و $\delta^-(i)$ برای هر $i\in I$ استفاده می‌شود، که به ترتیب مجموعه نقاط ورودی به و خروجی از i را نشان داده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\delta^+(i)=\{j:(i,j)\in E\} \qquad (۱)$$

$$\delta^-(i)=\{j:(j,i)\in E\} \qquad (۲)$$

متغیرهای تصمیم مسأله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

z_v: اگر وسیله نقلیه v به کار گرفته شود ۱ و در غیر این صورت صفر است.

x_{ij}^v: اگر وسیله نقلیه v کمان (i,j) را بپیماید ۱ و در غیر این صورت صفر است.

با تعاریف بالا، اکنون می‌توان مدل ارایه شده را در قالب یک مدل «برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح»[۱۶] نوشت تا اهداف و محدودیت‌های مربوطه با جزئیات بیشتر بیان شوند. لازم به ذکر است که مدل ارایه شده بر مبنای فرمول‌بندی «تبادل شبکه‌ای چند مبدأ-مقصدی با ظرفیت محدود وسیله»[۱۷] (Wang, 2018) نوشته شده است، که شکلی مرسوم برای فرمول‌بندی مسأله مسیریابی وسیله نقلیه به حساب می‌آید. لازم به ذکر است که مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده ظرفیت

محدود وسیله نقلیه را با امکان برگشت به دپو قبل از پرشدن فراهم می‌آورد، تا از این طریق بتوان در کنار امکان بکارگیری تعداد بیشتر وسایل نقلیه، هزینه اولیه بکارگیری آنها را همراه با هزینه عملکرد آنها (میزان زمان سفر کل طی شده توسط وسایل نقلیه) کمینه کرد. مدل ارائه‌شده به صورت زیر است:

تابع هدف:

$$Minimize \quad VOT \cdot \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in E} t_{ij} x_{ij}^{v} + \sum_{v \in V} z_v c \qquad (۳)$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in \delta^{+}(i)} x_{ij}^{v} = 1, \qquad \forall i \in I, \qquad (٤)$$

$$\sum_{j \in \delta^{+}(0)} x_{0j}^{v} = 1, \qquad \forall v \in V, \qquad (٥)$$

$$\sum_{i \in \delta^{-}(j)} x_{ij}^{v} - \sum_{i \in \delta^{+}(j)} x_{ji}^{v} = 0, \quad \forall j \in N, v \in V, \qquad (٦)$$

$$\sum_{i \in \delta^{-}(n+1)} x_{i,n+1}^{v} = 1, \qquad \forall v \in V, \qquad (٧)$$

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in \delta^{+}(i)} x_{ij}^{v} \le Q, \qquad \forall v \in V, \qquad (٨)$$

$$M \cdot z_v \ge \sum_{i \in N} \sum_{j \in \delta^{+}(i)} x_{ij}^{v}, \qquad \forall v \in V, \qquad (٩)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij}^{v} \le |S| - z_v, \ \forall v \in V, S \subseteq N, |S| > 2 \qquad (١٠)$$

$$z_v, x_{ij}^{v} \in \{0,1\}, \quad \forall v \in V, \ \forall (i,j) \in E. \qquad (١١)$$

که در آن، VOT ضریب تبدیل زمان سفر به هزینه یا ارزش پولی زمان سفر، و t_{ij} زمان سفر روی کمان (i, j)، c هزینه اولیه استخدام یک وسیله، و M یک عدد بزرگ است. محدودیت (٤) تضمین می‌کند که هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله خدمت‌دهی شود. محدودیت‌های (٥) تا (٧) تضمین می‌کنند که هر وسیله تنها برای یک مسیر انتخاب می‌شود، به این ترتیب که هر وسیله با شروع از دپو و ارائه خدمت در نقاط تقاضا (مشتریان)ی قرار گرفته در مسیرش مجدداً به دپو برمی‌گردد. لازم به ذکر است که برخی وسیله‌ها ممکن است اصلاً بکار گرفته نشوند. در این صورت، وسیله بکارگرفته‌نشده سفر خود را از دپو شروع کرده و بدون ادامه به سمت نقاط تقاضا به دپو ختم می‌شود، و به عبارت دیگر، یک حلقه بسته در دپو خواهد داشت. این نحوه برخورد با عدم بکارگیری وسیله، برای سهولت فرمول‌بندی‌ها انتخاب شده است. محدودیت (٨) به منظور عدم تجاوز از ظرفیت هر وسیله ساخته شده است. محدودیت (٩) برای محاسبه متغیر z_v نوشته شده است. محدودیت (١٠) از ایجاد مسیرهای بسته با تعداد نقطه کمتر از کل نقاط تخصیص داده شده به یک مسیر جلوگیری می کند. محدودیت (١١) صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم مسأله را تضمین می‌کند.

۳-۳ الگوریتم حل

در این بخش توضیح داده می‌شود که چگونه برای انجام فرآیند بالا از الگوریتم فرا-ابتکاری مورچگان استفاده شده است. ساختار الگوریتم ارایه شده در این قسمت –به غیر از دو تفاوت اصلی که در ادامه، و پس از ذکر خلاصه‌ای درباره چگونگی کارکرد الگوریتم مورچگان، توضیح داده خواهد شد– شبیه به الگوریتم ارایه شده توسط بِل و مک‌مولن (Bell and McMullen, 2004) است، که بعدها برای حل مسأله مسیریابی اتوبوس مدرسه به کار گرفته شده است (Babaei and Rajabi-Bahaabadi, 2019) و با تغییراتی در این مطالعه مورد استفاده قرار می گیرد.

مبنای الگوریتم مورچگان استفاده از مورچه‌های مصنوعی است که برای یافتن مسیرها رفتار مورچه‌های واقعی را (مانند حفظ مسیرهای پیشین و اطلاع از فاصله تا سایر مکان‌ها) شبیه‌سازی می‌کنند. برای ارتباط با یکدیگر، مورچه‌های واقعی موادی را روی مسیر بر جای می‌گذارند که فرومون[۱۸] نامیده می‌شود، و هر مسیری که فرمون بیشتری داشته باشد اهمیت بیشتری برای انتخاب توسط مورچه‌ها خواهد داشت. بنابراین، طراحی الگوریتم مورچگان دو فرآیند کلی را در بر دارد: «ساخت مسیر»[۱۹] و «به‌هنگام‌سازی ردپا (فرمون)»[۲۰]. در الگوریتم ارایه شده توسط بِل و مک‌مولن (Bell and McMullen, 2004) هر مورچه نماینده یک وسیله نقلیه است، که هر وسیله

دقیقاً به یک مسیر اختصاص می‌یابد. روند ساخت مسیر به این صورت است که هر مورچه از مبدأ (دپو) شروع به حرکت کرده و نقاط تقاضای دیده شده را افزایش داده تا ظرفیت موجود وسیله نقلیه به کمترین مقدار ممکن برسد یا تمام نقاط دیده شوند. آنگاه وسیله نقلیه (مورچه) به مبدأ (دپو) بر می‌گردد. سپس باید فرآیند به‌هنگام‌سازی ردپا به منظور حصول بهبود در حل‌های مراحل بعدی صورت پذیرد. به‌هنگام‌سازی ردپا شامل دو مرحلهٔ «به‌هنگام‌سازی محلی»[۲۱] و «به‌هنگام‌سازی کلی»[۲۲] است؛ به‌هنگام‌سازی محلی پس از تولید هر حل انجام می‌شود و به‌هنگام‌سازی کلی با اضافه کردن فرمون به تمام کمان‌های موجود روی بهترین مسیر به دست آمده از یکی از m مورچه فعال است.

همان طور که پیشتر گفته شد، الگوریتم مورچگان در این مقاله به الگوریتم ارایه شده توسط بِل و مک‌مولن (Bell and McMullen, 2004) شباهت دارد، ولی با دو تفاوت عمده که در زیر آمده است:

یکی از تفاوت‌های اصلی به چگونگی ساخت مسیرها برمی‌گردد، آنجا که مسیر پیموده شده توسط هر مورچه در مطالعه بِل و مک‌مولن از دپو شروع شده و با دیدن یک سری نقاط تقاضا –تا جایی که ظرفیتش اجازه می‌دهد– به دپو برمی‌گردد تا یک مسیر بسازد. ولی در این مقاله، هر مورچه می‌تواند، با حفظ محدودیت ظرفیت وسیله، مسیرهای متوالی (دسته–مسیرها) را به گونه‌ای بسازد که همگی از دپو آغاز و به دپو ختم شوند. بنابراین، در مورچگان بکارگرفته شده در این مقاله هر مورچه ممکن است بیشتر از یک وسیله نقلیه را شبیه‌سازی کند. این روش اجازه می‌دهد تا در هر مرحله ساخت مسیر بتوان دسته–مسیر ساخته شده (و در نتیجه تابع هدف به دست‌آمده) توسط یکی از m مورچه را به عنوان دسته–مسیر برتر انتخاب کرد.

تفاوت اصلی دیگر به چگونگی در نظر گرفتن هزینه بکارگیری وسیله نقلیه موجود در تابع هدف برمی‌گردد، که این قسمت از هزینه در مطالعه بِل و مک‌مولن –که یک مسأله مسیریابی کلاسیک به حساب می‌آید و تابع هدف آن مجموع مسافت پیموده شده توسط وسیله است– وجود ندارد. برای در نظر گرفتن این تفاوت عمده، مورچه‌ها باید بتوانند حتی قبل از این که تمام تقاضای ممکن (کمتر از ظرفیت خود) را پاسخ بگوید به دپو بازگردند، تا از این طریق بتوان امکان خدمت‌رسانی به تمام تقاضا را با تعداد مختلف وسیله –که البته این تعداد حتماً کمتر از $\|V\|$ است– فراهم آورد. بدین منظور، یک روش تصادفی–مبنا طراحی شده است که طبق آن هر وسیله بتواند قبل از رسیدن به ظرفیت به دپو برگردد. در روش پیشنهادشده، پارامتر تصادفی χ پارامتری است که بازگشت وسیله نقلیه را به دپو کنترل می‌کند:

$$\chi = \min\{\theta \cdot \zeta \cdot (TRD/TRC), 1\} \qquad (۱۲)$$

که در آن، θ یک پارامتر تصادفی یکنواخت بین صفر و یک، ζ پارامتری برای کالیبره کردن مدل، TRD مجموع تقاضای پاسخ‌داده‌نشده تا مرحله کنونی الگوریتم، و TRC مجموع ظرفیت باقی‌مانده تا مرحله کنونی الگوریتم است. برای محاسبه TRC می‌بایست ظرفیت وسایل نقلیه‌ای که تا کنون استفاده نشده‌اند با ظرفیت خالی وسیله‌ای که در مورد آن تصمیم‌گیری می‌شود جمع گردد. در این روش، هرگاه عدد تصادفی ξ که مطابق توزیع یکنواخت بین صفر و یک استخراج شده از χ بزرگتر باشد وسیله به دپو برمی‌گردد، وگرنه به نقطه تقاضای بعدی می‌رود.

الکوریتم مورچگان یک سری پارامترهای عمومی (غیر از موارد توضیح داده شده در بالا) دارد که باید برای حل مسأله تعیین شوند. این پارامترها، شامل پارامتر کنترل سرعت تبخیر، پارامتر کنترل اهمیت فاصله، و پارامتر انتخاب مسیر مورچه می‌باشند که معمولاً به ترتیب با φ، β و γ_0 نشان داده می‌شوند. از آن جا که الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله برمبنای الگوریتم بِل و مک‌مولن ساخته شده است، مقادیر توصیه شده در آن مطالعه برای پارامترهای مشترک و عمومی مذکور برابر با ۰/۱، ۲ و ۰/۹

در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که نتایج کالیبراسیون این مقاله نیز مناسب بودن پارامترهای مذکور را تأیید می‌کند. اما، پارامتر دیگری که در هر دو الگوریتم مشترک است و مطالعه حاضر مقادیر متفاوتی را از مطالعه بِل و مک‌مولن ارائه می‌کند، تعداد مورچگان m است که توضیحات مربوط به آن در بخش بعد به تفصیل ارائه می‌شود.

٤. نتایج بکارگیری مدل

٤-١ معرفی شبکه

در این بخش، شبکه شهر مشهد به عنوان مطالعه موردی، برای ارزیابی مدل پیشنهادشده، انتخاب شده است. مراکز نواحی ترافیکی شهر به عنوان نقاط تقاضا و مسیرهای بین هر زوج مبدأ-مقصد به عنوان کمان‌های شبکه در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه زمان سفر بین مبادی و مقاصد مختلف، از محاسبه زمان سفر شبکه معابر شهر مشهد در سال ۱۳۸۷ استفاده شده است. زمان سفر معابر با استفاده از مدل تخصیص ترافیک تعادلی مسافر برای دوره اوج صبح به دست آمده است تا بتوان تراکم ترافیکی را در جهات رفت و برگشت معابر به طور واقعی در نظر گرفت. میانگین و انحراف استاندارد زمان سفرها (روی کل ماتریس زمان سفر) به ترتیب ۷/۷۰ و ٤/۳۲ دقیقه است. شبکه حمل‌ونقلی شهر مشهد شامل ۲۵۳ ناحیه ترافیکی و حدود ۳۸۰۰ قطعه معبر است. شکل ۱ نحوه تقسیم‌بندی شهر مشهد در قالب نواحی ترافیکی و شکل ۲ کمان‌ها و گره‌های شبکه معابر را نشان می‌دهد. به منظور سهولت پی‌گیری و مقایسه نتایج اجرای مدل، برای هر یک از ۲۵۳ مشتری تقاضایی برابر واحد و ظرفیت هر وسیله ۲۵ در نظر گرفته شده است، یعنی هر وسیله در بهترین حالت می‌تواند ۲۵ مشتری را ملاقات کند. ضریب VOT نیز برابر ۱ در نظر گرفته شد. بدین معنی که یک دقیقه زمان سفر یک واحد پولی ارزش (یا هزینه) دارد. البته این پارامتر در اینجا برای راحتی محاسبات (و با این دلیل که مقدار آن نسبت به پارامتر C تعیین‌کننده ارزش عبارات مختلف در تابع هدف است) برابر با ۱ انتخاب شده است و در الگوریتم پیشنهادی امکان تغییر آن به هر عددی وجود دارد.

٤-٢ نتایج

در الگوریتم حل پیشنهادشده، دو پارامتر m (تعداد مورچه) و ζ (پارامتری که بازگشت وسیله (مورچه) به دپو را کنترل می‌کند و هرچه مقدار آن بزرگتر باشد بدین معنی است که وسیله باید مسیر خود را ادامه دهد تا تعداد مشتری بیشتری را ملاقات کند، و در حقیقت با افزایش هزینه وسیله بهتر است مقدار آن نیز افزوده گردد)، با تغییر C از ۵۰ تا ۵۰۰ و تغییر ζ از ۱ تا ۱۰۰ و تغییر m از ۳ تا ۵۰ تعداد زیادی مسأله حل شد تا بهترین مقادیر برای m و ζ به دست آید. هزینه اولیه بکارگیری وسیله (C) برابر با ۵۰ بدین معنی است که برای استخدام هر راننده با وسیله‌اش در یک روز، جدای از ساعات کاری وی، می‌بایست هزینه اولیه‌ای معادل ۵۰ واحد پولی پرداخت شود. نتایج نشان داد که نمی‌توان مقادیر یکتایی برای m و ζ توصیه کرد، و مقادیر بهینه آن‌ها وابسته به مقدار C متغیر است. با این وجود، از آن جا که بهترین مقدار m تقریباً در تمام موارد بین ۷ تا ۲۳ به دست آمد و مقدار بهینه تابع هدف خیلی به m حساس نبود، مقدار ۱۲ برای آن انتخاب شد. با این حال، باید توجه کرد که با افزایش تعداد مورچه‌ها همواره می‌توان با تکرار کمتر الگوریتم به حل رسید، ولی این موضوع می‌تواند باعث افزایش زمان حل شود. برای مثال، شکل ۳ نشان می‌دهد که با تعداد مورچه ۱۲ در تکرار ۷۰ و با تعداد مورچه ۵۰ در تکرار ۲۲ به حل یکسانی دست یافته شده و با تعداد مورچه ۷ حتی پس از ۲۰۰ تکرار حل بهینه به دست نیامده است. در حالت اول الگوریتم باید ۱۲×۷ (برابر با ۸٤۰) بار در حالت دوم ۵۰×۲۲ (برابر با ۱۱۰۰) و حل به دست آمده از هر مورچه را ارزیابی کند، و بنابراین در حالت دوم زمان اجرای الگوریتم بیشتر خواهد بود.

قابل ذکر است که در هر یک از این مسائل با توجه به تعداد مورچه و تکرار الگوریتم به زمان‌های اجرای مختلفی دست یافته

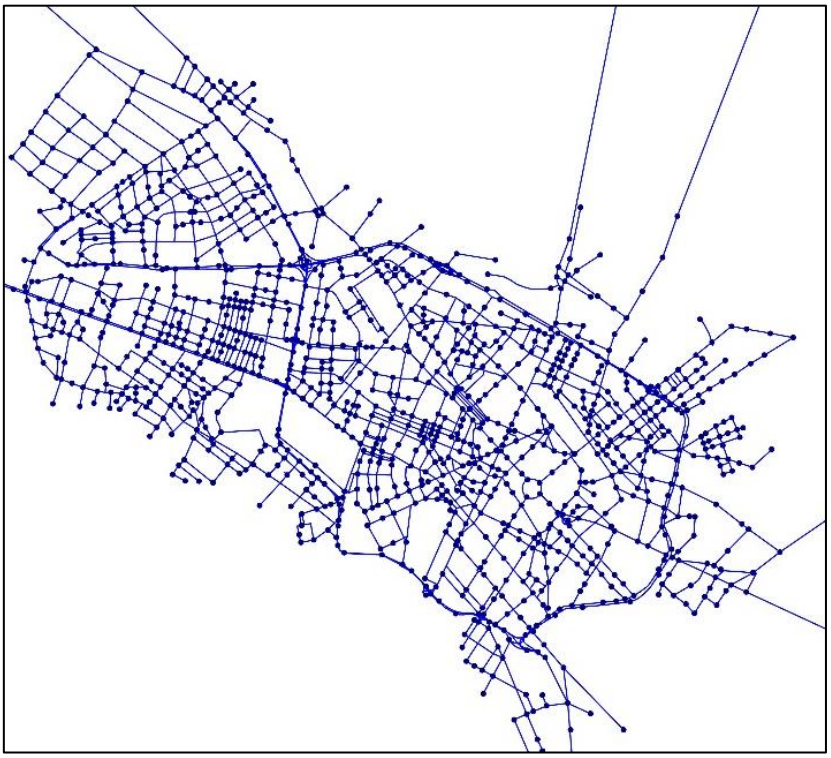
شده است. اما می‌توان گفت که به طور میانگین (برای تعداد مورچه ۸ و ۱۰۰ تکرار) زمانی در حدود ۱/۵ ثانیه به دست می‌آید. تمام نتایج با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB روی کامپیوتر شخصی با پردازشگر Intel GHz Core2Duo 2.66 به دست آمده‌اند.

بهترین مقادیر به دست آمده برای ζ بین ۱ تا ۵۰ و بسته به مقدار C متغیر است. این تغییرات در شکل ٤ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل برمی‌آید، از C برابر ۵۰ تا ۳۰۰ مقدار ζ تقریباً به طور خطی زیاد شده و سپس برای مقادیر C برابر ۳۵۰ و بیشتر از آن به طور ثابت ۵۰ باقی مانده است. دلیل این موضوع را می‌توان در تعداد حداقل وسیله مورد نیاز برای پاسخ‌گویی به کل تقاضا دانست، که در این مثال حداقل برابر ۱۱ است و با بیشتر کردن ζ (افزودن تعداد مشتریان خدمت‌داده‌شده با هر وسیله) نمی‌توان حل امکان‌پذیر بهتری –که تعداد وسیله مورد نیاز آن کمتر از ۱۱ عدد باشد– پیدا کرد.

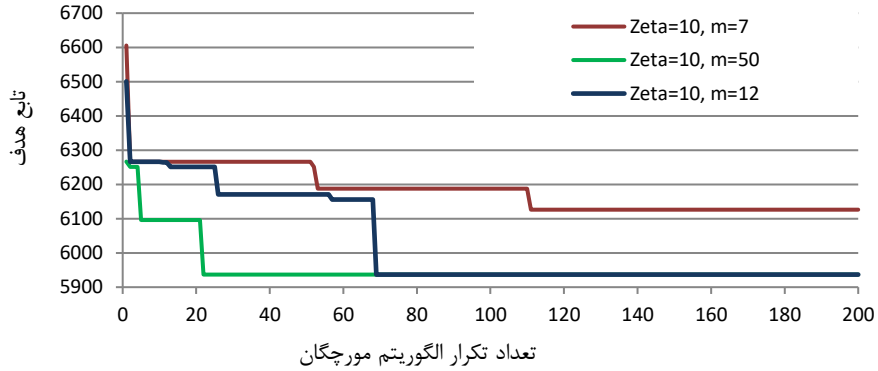
به هر حال، شکل ۵ نتایج اجرای مدل برای شهر مشهد با در نظر گرفتن عدد ۳۰۰ برای هزینه اولیه بکارگیری وسیله (C) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در برخی مسیرها تداخل بین نقاط در مناطق مختلف وجود دارد، و این گونه نیست که حتماً نقاط مربوط به یک منطقه خاص به یک وسیله اختصاص یابند. همچنین، نقاط تقاضای تخصیص‌داده‌شده به مسیرهای مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

بدیهی است که با کاهش هزینه اولیه بکارگیری وسیله نقلیه (C) تعداد مسیرها می‌تواند افزایش یابد تا از این طریق به زمان کمتری در مسیرها دست یافته شود و در عوض تعداد وسیله بکارگرفته‌شده افزایش یابد. برای مثال، جدول (۳) حالتی را نشان می‌دهد که هزینه بکارگیری وسیله نقلیه از ۳۰۰ به ۱۵۰ واحد پولی کاهش داده شده است. نتایج جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که مدل سعی می‌کند با استفاده از ظرفیت یکسان (تا جایی که امکان آن وجود داشته باشد) برای وسایل تقاضا تخصیص دهد تا هزینه کل کمینه شود. همان‌طور که در مسیرهای ۳ و ۲۵ در جدول (۳) دیده می‌شود، میزان تقاضای این دو مسیر به ترتیب ۲۹ و ۵ به دست آمده است، در حالی که با تخصیص تقاضای ۳۱ و ۳ نیز می‌توانست تعداد مسیر مقدار موجود ۲۵ به دست آید. اما، این موضوع، با توجه به زمان سفر بین نقاط تقاضای تخصیص‌یافته، از مقدار بهینگی جواب می‌کاست. به این ترتیب، شاید بتوان گفت در شرایطی که مقدار هزینه بکارگیری هر وسیله نقلیه نسبت به هزینه زمان سفر بین نقاط بیشتر است (مانند شرایط حاکم در مثال موردی در این مقاله)، نتایج مدل به سمت کاهش تعداد وسایل نقلیه رفته و همزمان سعی در استفاده مساوی از ظرفیت قابل استفاده وسایل نقلیه دارد. البته، نباید فراموش کرد که امکان تقسیم تقاضای نقاط به مسیرها برای به وجود آمدن تقاضای مساوی برای مسیرها نیز حائز اهمیت است و در شرایطی –که تقاضای نقاط زیاد و پراکنده تر باشد– ممکن است سقف ظرفیت قابل استفاده از وسایل نقلیه نیز کاملاً متفاوت باشد.

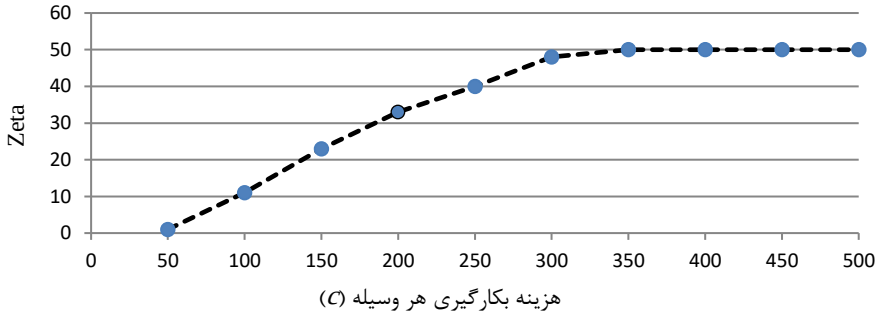
شکل ۱. نمایش نقاط تقاضا در مراکز نواحی ترافیک شهر مشهد



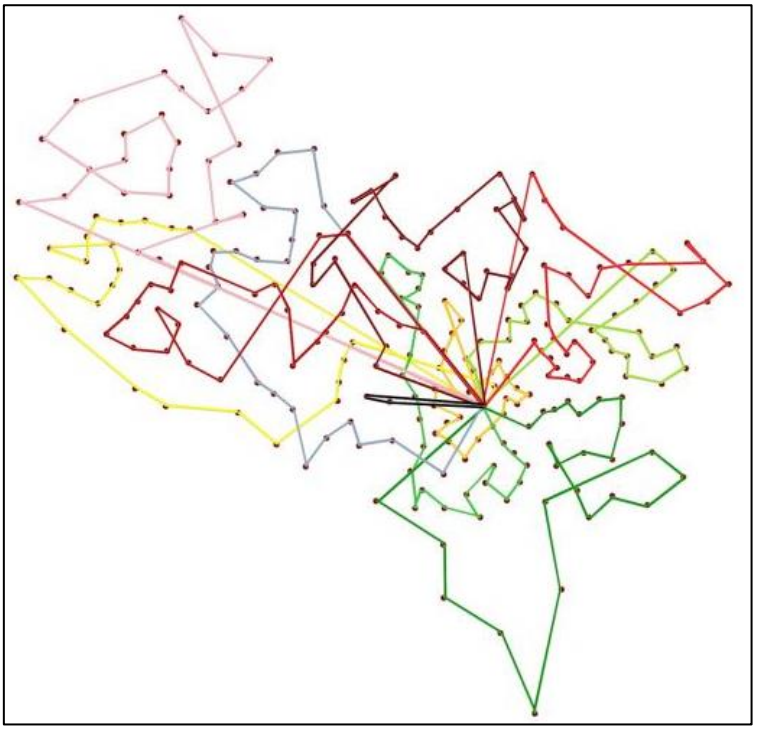
شکل ۲. نمایش گره‌ها و کمان‌های شبکه حمل و نقلی مدلسازی‌شده شهر مشهد



شکل ۳. روند همگرایی الگوریتم مورچگان با تعداد مورچه مختلف و C برابر ۵۰۰



شکل ٤. تحلیل حساسیت روی هزینه بکارگیری وسیله- مقادیر مناسب پارامتر ζ به ازای C های مختلف



شکل ۵. نتایج اجرای مدل برای شهر مشهد با در نظر گرفتن عدد ۳۰۰ برای هزینه اولیه بکارگیری وسیله

جدول ۲. نقاط تقاضای تخصیص‌داده‌شده به مسیرهای مختلف با در نظر گرفتن عدد ۳۰۰ برای هزینه اولیه بکارگیری وسیله

	مسیر۱	تقاضا	مسیر ۲	تقاضا	مسیر۳	تقاضا	مسیر٤	تقاضا	مسیر٥	تقاضا	مسیر٦	تقاضا	مسیر۷	تقاضا	مسیر۸	تقاضا	مسیر۹	تقاضا	مسیر۱۰	تقاضا
شماره نقاط تقاضای قرارگرفته روی مسیر و میزان تقاضای هر نقطه	۲	۳	۹	۲	۱۱	۱	۱۸	۱	۵۷	٤	۷۳	٤	۱۲۷	۳	۱۱٦	۵	۱۷۳	۳	۱٤٦	۵
	۳	۱	۲۱	٤	۲٦	٤	۱۹	٤	۹۲	۲	٤۰	۱	۱۵۱	۳	۱۸۵	۲	۱۸۷	۳	۱٦۷	۳
	٤	٤	۳۷	۳	٤۲	۱	۳۱	۳	۱۱۰	۲	۷٤	٤	۱۷٦	۵	۱۸٤	٤	۱۹٤	۳	۱٦۵	۳
	۱۲	۳	۳۸	۵	٤۳	۳	٤۵	۳	۱۳۹	۱	۱۰۰	٤	۱۹۳	٤	۱۸۳	۲	۱۹۵	٤	۱٦٤	٤
	۲۷	۳	۳۹	۳	۵۹	٤	٤٦	۳	۱٤۰	٤	۹۹	۲	۱۹۲	۵	۱۸۲	٤	۱۸٦	٤	۱٦۳	۲
	۱۳	۱	۷۲	۲	٦۰	۳	٤۷	۲	۱٤۱	٤	۱۱۷	٤	۱۹۱	۳	۱۸۱	۱	۱۷۲	۲	۱۸۰	۲
	۱٤	۳	۷۱	۵	۷۷	۵	۳۲	۱	۱۱۲	۲	۱۱۸	۳	۱۹۰	٤	۱٦٦	٤	۱۷۱	۳	۲۱٤	٤
	۱۵	۱	۷۰	٤	۱۰٦	۳	۵٦	۱	۱۱۱	۲	۱٤۷	۲	۱۷۷	۳	۲۰٤	۲	۱۷۰	٤	۲۱٦	۵
	٦	٤	٤۸	۵	۱۰۷	٤	۹۰	۲	۱۵۷	۵	۱۱۹	۳	۱۵٤	۵	۲۱۳	۳	۱۵۳	۲	۲۰٦	۳
	۵	۳	٦۹	۲	۷۸	۲	۹۱	۳	۱۷۸	۵	۱۰۲	۲	۱۵۵	۳	۲۱۲	۲	۱٤۸	٤	۱۵۲	۳
	۷	۳	۹۳	۲	٦۱	٤	۱۳۸	۲	۲۰۸	٤	۱۰۱	٤	۱۳۱	٤	۲۱۸	۱	۱٦۹	۵	۲۵۳	۲
	۸	۲	۹٤	۳	٦۲	۲	۱۳۷	۳	۲۲۳	٤	۱۲۰	۵	۱۲۹	۲	۲۲۸	٤	۱٦۸	۲	۲۵۲	٤
	۲۰	٤	۹۵	۲	۵۱	۳	۱۳٦	۳	۲۲٤	۳	۱٤۹	۱	۸٤	٤	۲۳۹	٤	۲۰۷	۵	۲٤۷	۲
	۳۳	۵	۹٦	۲	۵۲	٤	۱۳۵	٤	۲۲۵	۲	۱۲۱	٤	۸۵	۲	۲٤۰	۳	۲۳۲	۵	۲٤٦	۳
	۳٤	۲	۹۷	۵	۵۳	۳	۱۵٦	۲	۲۲٦	۲	۱۰۵	٤	۸٦	٤	۲٤۳	۳	۲۳۳	۵	۲۵۱	۲
	۳۵	۳	۹۸	۱	۲۸	۲	۸۹	۳	۲۲۷	۲	۱۵۰	۲	٦٤	۲	۲٤۲	٤	۲۳٤	۱	۲۳۸	۳
	۵۸	۱	۱۱۵	٤	۵٤	٤	۸۸	۳	۲۱۹	۳	۱۲٤	۳	۸۷	۱	۲٤۱	۲	۱۲۲	٤	۱۹۸	۵
	۳٦	۱	۱۱٤	٤	۵۵	۲	۱۳٤	۲	۲۱۱	۵	۱۲۵	٤	٦۵	۱	۲٤۸	۲	۱۳۰	۳	۱۷۹	۳
	۲۲	۳	۱۱۳	۵	۸۰	۲	۱۰۹	٤	۲۱۰	۵	۱۲٦	٤	۲۹	۱	۲٤۹	٤	۲۳۵	٤	۱۹۹	۳
	۲۳	۳	۱٤۲	۳	۸۳	۵	۱۳۳	۵	۲۲۰	۳	۱۷٤	۳	۱٦۲	۱	۲۳۷	۵	۲۳۱	٤	۱٦۰	۲
	۱۰	۲	۱۵۸	۵	۸۲	۱	۱۳۲	۳	۲۲۱	۲	۱۷۵	٤	۱٦۱	۲	۲۵۰	۵	۲۱۵	۳	۱٤۵	۲
	۲٤	۵	۱۵۹	۱	۸۱	۱	۱۰۸	۲	۲۲۲	٤	۱۸۸	۲	۲۰۰	۳	۲۳٦	۲	۲۰۵	۲	۱٤٤	۲
	۲۵	۲	۱۹۷	۱	۷۹	۲	۱۰٤	۳	۲٤۵	۲	۱۸۹	۳	۲۰۱	۵	۲۳۰	۱			۱٤۳	۲
	٤۱	۲	۲۰۹	۱	٦۳	۳	٦٦	۳	۲٤٤	۳	۱۲۸	۳	۲۰۲	۲	۲۲۹	٤			٦۸	۳
	٤۹	۲	۱۹٦	۱	۵۰	٤	٦۷	۱					۲۰۳	۳	۲۱۷	۲				
	۷۵	۲			٤٤	۳	۳۰	۳												
	۱۰۳	۲					۱۷	۳												
	۷٦	۳					۱٦	۳												
	۱۲۳	۲																		
مجموع تقاضا		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۵		۷۲

جدول ۳. نقاط تقاضای تخصیص‌داده‌شده به مسیرهای مختلف با در نظر گرفتن عدد ۱۵۰ برای هزینه اولیه بکارگیری وسیله

نام مسیر	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳	مسیر ۴	مسیر ۵	مسیر ۶	مسیر ۷	مسیر ۸	مسیر ۹	مسیر ۱۰	مسیر ۱۱	مسیر ۱۲	مسیر ۱۳	مسیر ۱۴	مسیر ۱۵	مسیر ۱۶	مسیر ۱۷	مسیر ۱۸	مسیر ۱۹	مسیر ۲۰	مسیر ۲۱	مسیر ۲۲	مسیر ۲۳	مسیر ۲۴	مسیر ۲۵
شماره نقاط تقاضای قرارگرفته روی هر مسیر	۲	۸	۹	۱۰	۱۱	۲۰	۱۷	۲۴	۳۰	۴۳	۲۲۶	۲۱۷	۴	۷۶	۶۹	۲۴۵	۲۱۰	۱۳۱	۱۱۶	۱۴۶	۱۲۷	۱۷۰	۱۱۳	۱۵۷	۱۰۹
	۳	۷	۲۱	۲۳	۲۶	۱۸	۱۶	۳۹	۱۳۴	۵۹	۲۲۵	۲۲۹	۵۱	۱۲۱	۹۳	۲۴۴	۲۱۱	۱۵۵	۱۱۵	۱۴۵	۱۵۱	۱۵۳	۱۱۴	۱۷۸	۵۸
	۱۲	۵	۳۵	۲۲	۲۵	۱۹	۲۹	۷۲	۸۸	۶۰	۲۲۴	۲۱۶	۵۰	۱۰۵	۹۴	۲۴۶	۲۳۸	۱۹۰	۱۴۳	۱۴۴	۱۷۷	۱۴۸	۱۶۰	۱۹۶	
	۲۷	۶	۳۴	۳۶	۴۱	۳۱	۴۴	۷۱	۸۹	۷۷	۲۲۳	۲۳۱	۵۲	۱۲۳	۱۱۱	۲۵۱	۲۳۷	۱۹۱	۱۶۲	۱۶۴	۱۷۵	۱۶۹	۱۹۹	۲۱۹	
	۱۳	۱۵	۳۳	۳۷	۴۹	۴۵	۶۵	۳۸	۱۳۵	۱۰۶	۲۲۲	۲۳۵	۱۰۳	۱۵۰	۱۴۰	۲۴۷	۲۴۹	۱۹۲	۱۶۱	۱۶۳	۱۷۳	۱۶۸	۱۹۸	۲۲۷	
	۱۴	۵۴	۵۷	۴۸	۷۵	۴۶	۶۴	۴۰	۱۳۶	۱۰۷	۲۲۱	۱۳۰	۱۲۰	۱۲۴	۱۴۱	۲۵۲	۲۲۸	۱۹۳	۲۰۰	۱۶۵	۱۸۷	۱۸۴	۲۰۸	۲۴۰	
	۲۸	۵۵	۶۸	۷۰	۱۴۷	۴۷	۸۶	۷۳	۱۳۷	۷۸	۲۲۰	۲۳۶	۱۰۲	۱۲۵	۱۱۲	۲۵۳	۲۳۹	۱۸۹	۲۰۱	۱۶۶	۱۷۲	۱۸۵	۲۱۵	۲۱۴	
	۵۳	۸۰	۹۲	۹۵	۱۱۸	۳۲	۸۵	۱۰۰	۱۵۶	۶۱	۲۴۳	۲۳۰	۱۱۹	۱۲۶	۱۴۲	۱۵۲	۲۱۸	۱۷۶	۲۰۲	۲۰۴	۱۸۶	۲۰۷	۲۳۳	۱۹۵	
	۶۳	۸۳	۹۱	۹۶	۱۱۷	۶۷	۸۴	۹۹	۱۳۳	۶۲	۲۴۲	۲۵۰	۱۰۱	۱۷۴	۱۵۸	۱۲۲			۲۰۳	۲۱۳	۱۷۱	۲۰۶		۷۴	
	۷۹	۸۲	۵۶	۹۷	۱۸۲	۶۶	۱۲۹		۱۳۲	۱۴۹	۲۴۱	۲۳۴		۱۸۸	۱۵۹	۲۳۲			۱۸۰	۲۱۲	۱۹۴				
	۱۱۰	۸۱		۹۸	۱۸۳	۱۰۴	۱۵۴				۲۴۸				۱۷۹	۱۸۱			۲۰۵	۲۰۹					
	۱۳۹	۱۲۸			۱۶۷	۸۷	۴۲													۱۹۷					
	۱۳۸					۱۰۸								۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۵
	۹۰													۷۶	۶۹	۲۴۵	۲۱۰	۱۳۱	۱۱۶	۱۴۶	۱۲۷	۱۷۰	۱۱۳	۱۵۷	۱۰۹
مجموع تقاضا	۳۱	۳۱	۲۹	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۱۲۱	۹۳	۲۴۴	۲۱۱	۱۵۵	۱۱۵	۱۴۵	۱۵۱	۱۵۳	۱۱۴	۱۷۸	۵۸

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی برای مسأله مسیریابی وسیله نقلیه حمل کالا با قابلیت در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و هزینه ثابت بکارگیری ناوگان ارائه شده است. در این مدل، مجموع هزینه‌های اولیه بکارگیری وسیله نقلیه (خرید یا اجاره وسیله نقلیه بعلاوه استخدام راننده) و نیز هزینه‌های وابسته به زمان سفر یا مسافت پیموده‌شده روی شبکه را به حداقل ممکن برساند. هزینه‌های وابسته به زمان یا مسافت سفر، در حقیقت نماینده هزینه‌های مربوط به استهلاک وسایل نقلیه، مصرف سوخت و ساعات اضافه‌کاری رانندگان است. به منظور حل مدل مذکور در شبکه‌های بزرگ (واقعی)، از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع مورچگان استفاده شده است. مدل پیشنهادشده برای شبکه واقعی شهر مشهد بکارگیری شده است. زمان حل مدل برای این مطالعه واقعی به طور میانگین (برای ۸ مورچه و ۱۰۰ تکرار الگوریتم) کمتر از ۲ ثانیه است. نکته با اهمیت در بکارگیری الگوریتم ارائه‌شده این است که پارامترهای الگوریتم (بخصوص پارامتر ζ) را نمی‌توان ثابت و از پیش‌تعیین‌شده فرض کرد. بلکه، این پارامترها می‌بایست با توجه به پارامترهای هزینه (یعنی هزینه اولیه بکارگیری خودرو و هزینه مدت زمان بکارگیری خودرو) تعیین شوند. در غیر این صورت، الگوریتم پیشنهادشده ممکن است به حل‌های دور از بهینه قطعی همگرا شود. به عنوان یک توصیه کلی می‌توان گفت که هر چه هزینه اولیه بکارگیری وسیله (یعنی C) بیشتر باشد، می‌بایست عدد بزرگتری برای پارامتر کنترل‌کننده بازگشت وسیله نقلیه به دپو (یعنی ζ) در نظر گرفت، تا از این طریق تعداد وسیله مورد استفاده کاهش یابد.

از دیگر نتایج این پژوهش، در خصوص مطالعه موردی شبکه شهر مشهد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نقاط قرار گرفته روی یک مسیر پراکنده بوده و لزوماً همگی در یک محدوده نزدیک قرار نمی‌گیرند. به این ترتیب، در یک الگوی بهینه، نقاط واقع در مناطق مختلف شهر ممکن است روی یک مسیر قرار گیرند. این موضوع به دلیل دست یافتن به زمان پیمایش کمتر وسایل نقلیه به وجود آمده است و بنابراین در صورت الزام به تخصیص نقاط واقع در یک منطقه به یک یا چند وسیله نقلیه ممکن است از میزان بهینگی کاسته شود.
- ظرفیت استفاده شده اغلب وسایل نقلیه به‌کارگرفته‌شده با یکدیگر برابر است، و این موضوع با کاهش و یا افزایش هزینه بکارگیری وسیله نقلیه مدل تغییر زیادی نمی‌کند.
- در وسایل نقلیه‌ای که ظرفیت استفاده نشده آنها بیشتر از سایر وسایل نقلیه است (تقاضای کمتری به آنها تخصیص داده شده است)، پراکندگی تقاضای جذب شده بیشتر است. به این معنی، که برای یافتن یک الگوی بهینه، نقاط دارای تقاضای حدوداً مشابه به وسایل نقلیه‌ای که با ظرفیت بالا بکارگیری می‌شوند و نقاط دارای پراکندگی تقاضا به وسایل نقلیه‌ای که با نقصان ظرفیت بکارگیری می‌شوند تخصیص داده شده‌اند.

۵-۲ پیشنهادات

در این مقاله، ظرفیت همه وسایل نقلیه مساوی با یکدیگر در نظر گرفته شده است. ممکن است در همه کاربردهای واقعی چنین فرضی برقرار نباشد و بتوان از وسایل نقلیه با ظرفیت‌های مختلف استفاده کرد. بنابراین، یک موضوع جالب برای پژوهش‌های آتی توسعه مدل ارائه‌شده برای مواردی با وسایل نقلیه دارای ظرفیت‌های ناهمسان است. همچنین، ممکن است برخی مشتریان محدودیت‌های زمانی برای دریافت خدمات داشته باشند، که در این صورت توسعه مدل ارائه شده در این مقاله به منظور در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی مشتریان، طیف دیگری از مسائل واقعی مسیریابی وسیله نقلیه را پوشش خواهد داد.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem (VRP)
2. NP-hard
3. Ant Colony Optimization (ACO)
4. Mathematical Programming
5. Undirected Graph
6. Combinatorial Optimization
7. Classical Heuristic
8. Meta-heuristic
9. Near-to-optimal
10. Local Optima
11. Genetic Algorithm
12. Simulated Annealing
13. Tabu Search
14. Particle Swarm Optimization
15. Honey Bee Optimization
16. Integer Linear Mathematical Programming
17. Multicommodity Network Flow with Capacity Constraint
18. Pheromone
19. Route Construction
20. Trail (Pheromone) Updating
21. Local Trail Updating
22. Global Trail Updating

٧. مراجع

– Babaei, M., & Rajabi-Bahaabadi, M. (2019). "School bus routing and scheduling with stochastic time-dependent travel times considering on-time arrival reliability." Computers & Industrial Engineering, Vol. 138, 106125.

– Bell, J. E., & McMullen, P. R. (2004). “Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem.” Advanced Engineering Informatics, Vol. 18, No. 1, PP. 41-48.

– Bullnheimer, B., Hartl, R. F., & Strauss, C. (1997). “Applying the ant system to the vehicle routing problem.” Second Metaheuristics International Conference, MIC’97, Sophia-Antipolis, France.

– Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W., & Vigo, D. (2007). “Vehicle routing.” Transportation, handbooks in operations research and management science, Vol. 14, PP. 367-428.

– Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). "The truck dispatching problem." Management science, Vol. 6, No. 1, PP. 80-91.

– Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). “The vehicle routing problem: A taxonomic review.” Computers & Industrial Engineering, Vol. 57, No. 4, PP. 1472-1483.

– Elshaer, R., & Awad, H. (2020). “A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants.” Computers & Industrial Engineering, 140, 106242.

– Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). “A tabu search heuristic for the vehicle routing problem.” Management science, Vol. 40, No. 10, PP. 1276-1290.

– Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Bräumlaysy, O., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2008). “Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: A categorized bibliography.” Springer.

– Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (2008). “The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges.” Springer.

– Guo, N., Qian, B., Hu, R., Jin, H. P., & Xiang, F. H. (2020). “A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Compartment Vehicle Routing Problem.” Complexity.

– Huang, S. H., Huang, Y. H., Blazquez, C. A., & Chen, C. Y. (2022). “Solving the vehicle routing problem with drone for delivery

Engineering Computations, Vol. 11, No. 4, PP. 549-564.

– Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., & Xiao, J. (2018). "Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost." Journal of cleaner production, Vol. 171, PP. 962-971.

– Osman, I. H. (1993). "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem." Annals of operations research, Vol. 41, No. 4, PP. 421-451.

– Potvin, J.-Y., Duhamel, C., & Guertin, F. (1996). "A genetic algorithm for vehicle routing with backhauling." Applied Intelligence, Vol. 6, No. 4, PP. 345-355.

– Rajabi-Bahaabadi, M., Shariat-Mohaymany, A., Babaei, M., & Vigo, D. (2021). "Reliable vehicle routing problem in stochastic networks with correlated travel times." Operational Research, Vol. 21, No. 1, PP. 299-330.

– Taş, D., Dellaert, N., Van Woensel, T., & De Kok, T. (2013). "Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time windows and service costs." Computers & Operations Research, Vol. 40, No. 1, PP. 214-224.

– Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). "A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants." European Journal of Operational Research, Vol. 286, No.2, PP. 401-416.

– Wang, I. L. (2018). "Multicommodity network flows: A survey, Part I: Applications and Formulations." International Journal of Operations Research, Vol. 15, No. 4, PP. 145-153.

services using an ant colony optimization algorithm." Advanced Engineering Informatics, Vol. 51, 101536.

– Jia, Y. H., Mei, Y., & Zhang, M. (2021). "A bilevel ant colony optimization algorithm for capacitated electric vehicle routing problem." IEEE Transactions on Cybernetics.

– Laporte, G. (1992). "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms." European Journal of Operational Research, Vol. 59, No. 3, PP. 345-358.

– Laporte, G., Nobert, Y., & Desrochers, M. (1985). "Optimal routing under capacity and distance restrictions." Operations research, Vol. 33, No. 5, PP. 1050-1073.

– Leite, M. R., Bernardino, H. S., & Gonçalves, L. B. (2022). "A variable neighborhood descent with ant colony optimization to solve a bilevel problem with station location and vehicle routing." Applied Intelligence, Vol. 52, No. 7, PP. 7070-7090.

– Marinakis, Y., Marinaki, M., & Dounias, G. (2008). "Honey bees mating optimization algorithm for the vehicle routing problem Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2007) (PP. 139-148): Springer.

– Marinakis, Y., Marinaki, M., & Dounias, G. (2010). "A hybrid particle swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem." Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, No. 4, PP. 463-472.

– Mutar, M., Burhanuddin, M., Hameed, A., Yusof, N., & Mutashar, H. (2020). "An efficient improvement of ant colony system algorithm for handling capacity vehicle routing problem." International Journal of Industrial

– Wu, H., Gao, Y., Wang, W., & Zhang, Z. (2021). “A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows.” Complex & Intelligent Systems.

– Xiang, X., Qiu, J., Xiao, J., & Zhang, X. (2020). “Demand coverage diversity based ant colony optimization for dynamic vehicle routing problems.” Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 91, 103582.

– Zhao, P. X., Luo, W. H., & Han, X. (2019). "Time-dependent and bi-objective vehicle routing problem with time windows." Advances in Production Engineering & Management, Vol. 14, No. 2, PP. 201-212.

محسن بابائی

محسن بابائی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل و طراحی شبکه‌های حمل و نقلی، و بهینه‌سازی و قابلیت اطمینان در انواع مسائل مهندسی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه بوعلی‌سینا است.