

مدلسازی ریاضی دو هدفه برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه با در نظر گرفتن تعداد سفر - مطالعه موردی

رضا توکلی مقدم (نویسنده مسئول)، استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

محمد مهدی توکلی، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی صنایع، اصفهان، ایران

محمد جابری، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱

چکیده

افزایش آلودگی هوا و همچنین گرم شدن کره زمین باعث شده است که تمرکز مدیران و برنامه‌ریزان شهری بیشتر معطوف به حمل و نقل پاک و به عبارتی دیگر حمل و نقل همگانی گردد. در همین راستا نیز دوچرخه به عنوان یکی از ارکان حمل و نقل پاک بسیار مورد توجه برنامه‌ریزان قرار گرفته است و سعی در فرهنگ‌سازی برای استفاده از آن می‌کنند. به همین دلیل و برای افزایش استفاده از سیستم‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه، در این مقاله به مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه و تعیین ظرفیت آن‌ها پرداخته می‌شود و به این منظور در ابتدا به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته می‌شود. در این مدل، تقسیم شهر به تعدادی ناحیه ترافیکی و تعیین تعداد ایستگاه‌های دوچرخه صورت می‌گیرد. اهداف مهم این مدل، کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و ظرفیتی است که بایستی در سطح شهر ایجاد و نصب گردد و همچنین بیشینه کردن فاصله دو ایستگاه که در ناحیه ایجاد می‌شوند، است. سپس الگوریتم تکاملی چندهدفه معروف به الگوریتم ژنتیک مرتب شده نامغلوب (NSGA-II) برای حل آن استفاده می‌شود. در انتها نیز برای ارزیابی قابلیت اجرایی مدل ارائه شده در این مقاله، مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه یک کلان‌شهر به عنوان مطالعه موردی انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم-NSGA II دو جواب را برای مسأله نشان داد که با مقایسه مقادیر تابع هدف در دو جواب بدست آمده نشان داد که جواب دوم که هدف اول مسأله را کمینه و هدف دوم را بیشینه نموده بود مناسب‌تر است.

واژه های کلیدی: مکان‌یابی ایستگاه دوچرخه، مدل‌سازی ریاضی دو هدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

۱. مقدمه

استفاده کننده می‌شوند. در این سیستم‌ها، استفاده‌کنندگان از دوچرخه، آن را در ایستگاه (مبدأ سفر) تحویل می‌گیرند و پس از مدت زمانی استفاده از آن، در همان ایستگاه یا ایستگاه‌های دیگر (مقصد سفر) آن را تحویل می‌نمایند؛ [Büttner et al. 2011]

[Caggiani and Ottomanelli, 2013]. با این وجود، سیستم‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه دارای محدودیت‌هایی نیز هستند که از آن جمله می‌توان بیان داشت که معمولاً دوچرخه برای سفرهای کوتاه و متوسط استفاده می‌شود و معمولاً در سفرهای یک‌طرفه نیز از آن استفاده می‌شود و این مسأله توازن نامتعادلی را از دوچرخه در طول زمان و فضا ایجاد می‌نماید. بنابراین برای مدیریت بهتر زمان، افزایش ظرفیت سیستم و رضایت استفاده‌کنندگان، مکان‌یابی آن اهمیت بسیاری پیدا می‌کند [Caggiani and Ottomanelli, 2013]. امروزه تخمین زده می‌شود که بیش از ۳۷۵ طرح مختلف وجود دارد که در هر منطقه از جهان گسترده شده است و بیش از ۲۴۰۰۰۰ دوچرخه در آن وجود دارد [Midgley, 2011]. یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت این برنامه‌های به اشتراک‌گذاری دوچرخه، انتخاب محل مناسب و ارتباط آن با میزان تقاضای سفر است [Lin and Yang, 2011]. برای اینکه ایستگاه‌های دوچرخه از طرف استفاده‌کنندگان مورد استفاده قرار گیرد بایستی فاصله آن‌ها از یکدیگر زیاد نباشد و این فاصله بایستی برای حمل و نقل با دوچرخه مناسب باشد [Shu et al. 2010].

جهت مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه، بایستی به منطقه‌ای که تحت پوشش قرار می‌گیرد توجه شود و با توجه به این‌که این ایستگاه‌ها دارای اهداف عمومی است، بایستی به مناطق تفریحی و با جاذبه‌های گردشگری نزدیک باشند. همچنین، ایستگاه‌ها بایستی در مجاورت یکدیگر و نزدیک به مراکز عمده تجاری واقع شوند تا در ایستگاه‌های مبدأ و مقصد استفاده‌کنندگان، تقاضا وجود داشته باشد و در این صورت می‌توان از آن به عنوان یک سیستم حمل و نقل ایده‌آل نام برد [Midgley, 2011].

یکی دیگر از مهم‌ترین نکات در مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه، ارتباط آن با شبکه حمل و نقل عمومی است [Martens, 2007]. دوچرخه به عنوان یک حالت مکمل برای سیستم حمل و نقل است و باعث افزایش شعاع نفوذ سیستم‌های حمل و نقل

در سالیان اخیر، برنامه‌ریزان شهری بیشتر تمرکز خود را بر روی ایجاد سیاست‌هایی برای ترویج فرهنگ استفاده از دوچرخه به جای خودرو دارند. استفاده هر چه بیشتر از وسایل حمل و نقل با آلودگی کمتر باعث ایجاد یک پویایی پایدار در شهر می‌شود و علاوه بر منافع اجتماعی آن همچون پایداری زیست محیطی و اقتصادی و عدالت اجتماعی، دارای منافع بسیاری نیز در سطح فردی است [Zahedian-Tejenaki and TavakkoliMoghaddam, 2015, Al-e-nouri et al. 2014]. همچنین با توجه به سالم و ارزان بودن، دوچرخه‌سواری می‌تواند در مراکز شهرهای بزرگ دارای کارایی بیشتر و همچنین سرعت بالاتری نسبت به خودروهای شخصی و حمل و نقل عمومی داشته باشد [Heinen et al. 2010].

برنامه‌ریزان شهری در بسیاری از موارد تلاش می‌کنند که به ایجاد زیرساخت‌هایی برای افزایش استفاده از دوچرخه بپردازند و به این منظور توجه به دوچرخه‌سواری را نسبت به استفاده از خودرو شخصی در اولویت قرار می‌دهند و همچنین تلاش می‌کنند که نرخ استفاده از دوچرخه را در ارتباط با حمل و نقل عمومی افزایش دهند [Dill and Voros, 2007]. یکی از اقداماتی که در سالیان اخیر بسیار مورد استفاده برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است، برنامه‌های اجاره دوچرخه یا به اشتراک‌گذاری دوچرخه است [Midgley, 2011]. برای اولین بار استفاده عمومی از دوچرخه در سال ۱۹۶۸ و در شهر آمستردام انجام گرفت و معروف به سیستم دوچرخه سفید بود. از آن زمان این سیستم‌ها گسترش زیادی پیدا کردند و مدل‌های بسیاری برای آن‌ها توسعه یافتند [Bonnette, 2007].

توسعه سیستم‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه در شهرهای بزرگ به ایجاد پایداری در حمل و نقل و سیستم‌های عمومی کمک می‌کند و علاوه بر آن، با استفاده از آن می‌توان این امکان را برای شهروندان ایجاد نمود که انتقال آنها به مکان‌هایی از شهر که امکان دسترسی به آن‌ها با وسایل حمل و نقل دیگر امکان‌پذیر نیست، فراهم شود. اعضای اصلی یک سیستم اشتراک‌گذاری دوچرخه شامل ناوگان دوچرخه، ایستگاه‌های دوچرخه و تعدادی

شود. همچنین حساسیت نتایج به معیار "هدف از سفر" بیش از سایر معیارهاست. بر اساس نتایج به دست آمده و وزن تعیین شده برای هر گزینه، توصیه شده است بودجه حمل و نقل عمومی متناسب با اولویت و وزن گزینه‌ها تعیین شده و تخصیص یابد [Ahadi et al. 2014].

ممدوحی و امینی در پژوهشی به بررسی میزان تأثیر سطح عرضه در تغییر شیوه سفر و استفاده از دوچرخه در سفرهای کار و تحصیلی پرداختند و به این منظور با استفاده از پرسشنامه، به جمع‌آوری نظرات شهروندان تهرانی در منطقه هشت شهرداری تهران پرداختند و با روش تحلیل عاملی اکتشافی، تأثیر سطح عرضه بر تغییر شیوه سفر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل عاملی به روش بیشینه درست‌نمایی، متغیرها را در قالب دو عامل بهبود تسهیلات دوچرخه و تغییر شرایط سفر دسته‌بندی مینماید. نتایج بیانگر آن است که در سفرهای کاری عامل تغییر شرایط سفر بیشترین تأثیر را بر تغییر شیوه سفر مسافران دارد، در حالی که کلیدی‌ترین عامل در سفرهای تحصیلی، بهبود تسهیلات دوچرخه‌سواری است [Mamdoohi and Amini, 2015].

آل‌نوری و همکاران در پژوهشی، به ارائه مدلی برای مکان‌یابی دوربین‌های ورودی محدوده زوج و فرد پرداختند و هدف مورد نظر آنها در این مدل، بیشینه کردن پوشش تخلفات بود. مدل ارائه شده توسط آنها جهت مکان‌یابی دوربین‌ها از نوع صفر و یک بوده و محدودیت‌های مختلفی از جمله محدودیت بودجه، تعداد نیروی انسانی و تعداد کمینه معابر در هر رده عملکردی در نظر گرفته شده است. جهت حل این مدل نیز از الگوریتم شاخه و کران استفاده شده است و در ادامه نیز به تحلیل حساسیتی بر روی هزینه و میزان پوشش تخلفات انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت هزینه‌ها نشانگر افزایش چشمگیر تخلفات پوشش داده شده تا هزینه تقریبی حدود ۵۵/۶ هزار میلیارد ریال و کاهش روند پوشش تخلفات پس از این محدوده است. این تحلیل و میزان پوشش تخلفات به ازای هزینه‌های مختلف تخصیص داده شده می‌تواند گامی موثر در جهت تسهیل تصمیم‌گیری مدیران به منظور تخصیص بودجه برای اجرای این طرح باشد [Al-e-nouri et al. 2014].

عمومی می‌شود. یکی دیگر از مواردی که در تعیین مکان ایستگاه‌های دوچرخه دارای اهمیت بسیاری است، دانستن توزیع بالقوه تقاضا در مکان‌های مختلف و تشخیص مناطقی که تولید کننده سفر می‌باشند [García-Palomares et al. 2012]. در این پژوهش نیز با توجه به اهمیت مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه در حمل و نقل و ترافیک شهرها، به ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت آن‌ها پرداخته می‌شود. به این منظور در ابتدا با تعیین متغیرها و پارامترهای تصمیم به مدل‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه و تعیین ظرفیت آن‌ها پرداخته خواهد شد و در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II، مدل ارائه شده حل خواهد شد. همچنین برای سنجش مدل نیز، مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه شهر اصفهان به عنوان مطالعه موردی انجام می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

در ارتباط با ترافیک شهری در کلان‌شهرهای ایران مطالعات زیادی انجام گرفته است که در زیر به تعدادی از آنها اشاره شده است:

احدی و همکاران در پژوهشی به اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف حمل و نقل عمومی در شهر تهران پرداختند و در ادامه با استفاده از این اولویت‌ها نیز مدیریت تخصیص بودجه حمل و نقل عمومی مورد بازنگری قرار گرفته است. به منظور در ابتدا معیارهای موثر در اولویت‌بندی گزینه‌های حمل و نقل عمومی در شهر تهران با استفاده از ادبیات تحقیق و نظرخواهی از خبرگان در معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران شناسایی شده و در ادامه، با استفاده از معیارهای ارزیابی و بکارگیری تحلیل سلسله مراتبی گروهی، گزینه‌های حمل و نقل عمومی در شهر تهران اولویت‌بندی و نتایج حاصله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که گزینه مترو دارای بالاترین اولویت در بین گزینه‌های مورد بررسی است و BRT، اتوبوس، ون و تاکسی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییر در وزن ۱۱ مورد از معیارها می‌تواند موجب تغییر در اولویت‌بندی گزینه‌ها

شود. آن‌ها همچنین داده‌های جریان دوچرخه در شهر را نیز تعیین کردند و با استفاده از آن به برنامه‌ریزی خطوط دوچرخه و سایر تجهیزات آن پرداختند [Jensen et al. 2010]. رومرو و همکاران در پژوهشی دیگر به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی bi-level پرداختند و در این پژوهش به دنبال بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های عمومی دوچرخه بودند. این مدل در سطوح پایین به تخصیص حالت‌های حمل و نقل و اتصال همزمان حالت‌های مختلف حمل و نقل با دوچرخه می‌پردازد که شامل تعاملات بین این سیستم‌ها نیز می‌شود. در ادامه نیز مدل پیشنهادی را برای شهر سانتاندر اجرایی کردند و مکان بهینه ایستگاه‌های عمومی دوچرخه را تعیین نمودند [Romero et al. 2012].

هینن و همکاران در پژوهشی مروری به بررسی عوامل موثر در استفاده از دوچرخه پرداختند و این عوامل را در گروه‌های محیط زیست (عمومی، زیرساخت، امکانات و غیره)، عوامل مربوط به محیط زیست طبیعی (توپولوگرافی، جذابیت‌های محیطی، آب و هوا و غیره)، عوامل اقتصادی، اجتماعی و روانی (نگرش و هنجارهای اجتماعی، اعتقادات و غیره) و عوامل دیگری همچون ابزارهای هزینه، زمان سفر، تلاش و ایمنی در نظر می‌گیرند [Heinen et al. 2010]. گارسیا پالومارس و همکاران در پژوهشی به ارائه روشی پرداختند که با استفاده از سیستم GIS به تعیین مکان‌های ایستگاه‌های دوچرخه می‌پردازد. به این منظور آن‌ها در ابتدا به تعیین شاخص‌های ارزیابی خود پرداختند و در ادامه در ابتدا توزیع پتانسیل تقاضای هر منطقه را محاسبه کردند و سپس مدل مکان‌یابی - تخصیص را ارائه کردند و سناریوهای مختلفی را پیشنهاد کردند و در انتها نیز ظرفیت هر ایستگاه را تعیین کردند [García-Palomares et al. 2012].

۳. مدل ارائه شده برای مکان‌یابی ایستگاه‌های

دوچرخه شهری

۱-۳ توضیح مسأله

با توجه به لزوم افزایش سطح حمل و نقل عمومی و همچنین حمل و نقل پاک در کلان‌شهرها، ایجاد ایستگاه‌های دوچرخه

یکی از مهم‌ترین حوزه‌های حمل و نقل عمومی نیز دوچرخه است و اخیراً تعدادی مقاله در ارتباط با مسأله اشتراک‌گذاری دوچرخه ارائه شده است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

در پژوهشی کانترادو و همکاران به ارائه یک مدل ریاضی برای مسائل پویا پرداختند و در آن شبکه فضا-زمان در نظر گرفته شده است [Contrado et al. 2012]. همچنین در پژوهشی دیگر نیز وگل و متفلد، به ارائه یک مدل اشتراک‌گذاری دوچرخه با در نظر گرفتن دریافت و تحویل دوچرخه پرداختند، اما در این پژوهش به الگوهای توزیع مجدد و دوره‌های زمانی توجه نشده است [Vogel and Mattfeld, 2010]. همچنین کاگیانی و اوتومانلی به ارائه یک مدل شبیه‌سازی میکرو در حالت توزیع مجدد دوچرخه‌ها در حالت پویا پرداختند. در مدل ارائه شده توسط آن‌ها، هدف کمینه کردن هزینه تغییر مکان و مسائل حمل و نقل برای اپراتورهای اشتراک‌گذاری دوچرخه بود. آن‌ها همچنین در مدل ارائه شده به سطح رضایت استفاده کنندگان نیز توجه کردند و به این منظور فرض کردند که سطح رضایت آن‌ها با افزایش سطح احتمال دسترسی به دوچرخه در هر مکان افزایش می‌یابد [Caggiani and Ottomanelli, 2013]. همچنین پژوهش‌هایی نیز در ارتباط با مسیر دوچرخه‌ها انجام شده است و از آن جمله می‌توان به مطالعه‌ی استینسون و بات اشاره کرد که به تعیین عوامل موثر در انتخاب مسیر دوچرخه پرداختند و این عوامل را در قالب دو دسته عوامل بر پایه ارتباط و عوامل بر پایه مسیر تقسیم کردند [Stinson and Bhat, 2003]. در پژوهشی نیز فرولیخ و همکاران با استفاده از تحلیل زمان-فضا در طول ۶ هفته در شهر بارسلونا بر روی حرکت دوچرخه‌ها به این نکته پی بردند که نتایج حاصل از تحلیل را می‌توان برای تعیین مسیرهای روزانه، تعیین نقش فرهنگ در حمل و نقل و همچنین بیان نقش زمان و فضا در پویایی شهر استفاده نمود [Froehlich et al. 2008].

جنسن و همکاران در پژوهشی با تحلیل بیش از ۱۱ میلیون سفر با دوچرخه در شهر لیون فرانسه بیان کردند که شبکه‌های دوچرخه در مرکز شهر لیون می‌تواند با استفاده از خودرو کامل

مدلسازی ریاضی دو هدفه برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه

ارائه شده در این پژوهش، در ابتدا با استفاده از روش‌های ترافیکی و GIS، شهر به تعدادی ناحیه ترافیکی تقسیم می‌شود و در ادامه مکان‌یابی با این اهداف انجام می‌گیرد.

• ناحیه‌بندی ترافیکی

در این مرحله، سعی می‌شود که با توجه به سطح تردد در نواحی مختلف شهر و همچنین سطح معابر و تعداد آن‌ها شهر به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود که هر یک از این نواحی معمولاً دارای کاربری‌های مختلفی می‌باشند و سطح تردد در آنها متفاوت خواهد بود.

• تعیین حجم سفرهای شهری در هر ناحیه ترافیکی

برای این که بتوان برنامه‌ریزی بهتری برای مکان‌یابی دوچرخه‌ها داشت در این مرحله بایستی بتوان با استفاده از نمونه‌گیری و همچنین روش‌های آماری، میزان سفر را در هر ناحیه تخمین زد. به این منظور سفرهای موجود در هر ناحیه به دو دسته سفر تقسیم می‌شود که به صورت زیر است:

سفر جذب شده: به سفرهایی که مقصد آن‌ها ناحیه Z است و مبدا غیر از ناحیه Z دارند، سفر جذب شده برای ناحیه Z گویند.
سفر تولید شده: به سفرهایی که مبدا آن‌ها ناحیه Z است و مقصدی غیر از ناحیه Z دارند، سفر تولید شده برای ناحیه Z گویند.

با توجه به این که برنامه‌ریزی برای سفرهای هر ناحیه بستگی به نوع سفر دارد هر یک از این سفرهای تولید شده و جذب شده نیز در هر ناحیه به تعدادی سفر تقسیم می‌شوند که این تقسیم‌بندی سفرها به صورت زیر است:

سفرهای کاری: سفرهایی که شهروندان برای انجام کارهای اقتصادی خود انجام می‌دهند.

سفرهای تحصیلی: سفرهایی که دانش‌آموزان و دانشجویان برای امور تحصیلی انجام می‌دهند.

سفرهای خرید: سفرهایی که به قصد خرید انجام می‌شود.

سفرهای کار شخصی: سفرهایی که به قصد انجام کار شخصی انجام می‌شود.

سفرهای تفریحی: سفرهایی که جهت تفریح انجام می‌گیرد.

یکی از راه‌های افزایش سطح آن است، که با توجه به لزوم دستیابی بیشتر شهروندان به آن‌ها، مکان‌یابی آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مرحله به توصیف مسأله پرداخته می‌شود و مسأله‌ای که مدل‌سازی خواهد شد به صورت کامل توضیح داده می‌شود.

در این پژوهش، به مدل‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه در شهر پرداخته خواهد شد. در این مدل، شهر به m ناحیه ترافیکی تقسیم می‌شود و در این مسأله بیشینه تعداد n ایستگاه دوچرخه مکان‌یابی می‌شود. در راستای مدل‌سازی مسأله‌ی بیان شده، مفروضاتی در نظر گرفته شده است که به صورت زیر است:

- هزینه‌ی ایجاد ایستگاه دوچرخه در تمام مکان‌های در نظر گرفته شده ثابت فرض شده است.
- فاصله ایستگاه‌ها تا یکدیگر به صورت متقارن است.
- فاصله ایستگاه‌ها از یکدیگر به صورت اقلبدسی در نظر گرفته شده است.

از مزایای مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش می‌توان به این نکته اشاره نمود که علاوه بر مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه، به صورت همزمان ظرفیت آن‌ها را نیز تعیین می‌نماید و اهداف آن نیز بر خلاف اکثر پژوهش‌های مشابه به صورت مستقیم بر کاهش هزینه‌ها تمرکز ندارد و سعی در کاهش تعداد و ظرفیت ایستگاه‌ها می‌کند و علاوه بر آن به دنبال بیشینه‌سازی فاصله ایستگاه‌ها است. افزون بر آن، در این پژوهش به تعداد سفر انجام شده در هر ناحیه ترافیکی توجه شده است که باعث می‌شود مکان‌یابی بر مبنای نیاز مسافران انجام گیرد و به دنبال پاسخگویی به تقاضای سفر باشد.

۲-۳ مدل‌سازی مسأله

در مدل‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه در سطح شهر بایستی سعی شود که ایستگاه‌ها بگونه‌ای مکان‌یابی شوند که سطح بیشتری از شهر را پوشش دهد و به عبارتی دیگر از پراکندگی مناسبی برخوردار باشند. با توجه به هزینه‌های ایجاد ایستگاه دوچرخه، بتواند با کمینه تعداد ایستگاه دوچرخه و ظرفیت تقاضا را پاسخگو باشد. با توجه به این مسأله، در مدل

جدول ۱. پارامترهای مدل

d_{ik}	فاصله مکان i از مکان k
α_t	درصدی از سفر نوع t که با دوچرخه انجام می‌شود.
P_{tj}	تعداد سفرهای تولید شده نوع t از ناحیه ترافیکی j .
U	بیشینه مسافر هر ایستگاه

در ادامه متغیرهای تصمیم مسأله تعیین می‌شود که به صورت یک متغیر صفر و یک و یک متغیر عدد صحیح است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

Q_i ظرفیت ایستگاه ایجاد شده در مکان i

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر محل } i \text{ ناحیه } j \text{ را پوشش دهد} \\ 0 & \text{در این غیر اینصورت} \end{cases}$$

در ادامه به بیان مدل ارائه شده پرداخته می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

سفرهای هیچ سر خانه: سفرهایی که در طول روز و بین کار انجام می‌گیرد و مبدا و مقصد آن خانه نیست. به عنوان مثال می‌توان بیان داشت که یک کارمند در طول روز برای انجام ماموریت سفری انجام می‌دهد.

سفر بازگشت: سفرهایی که شهروندان پس از اتمام فعالیت و در بازگشت به خانه انجام می‌دهند.

حال با توجه به این‌که معمولاً شهروندان برای هر نوع سفر از وسایل مختلفی استفاده می‌کنند، بنابراین درصد مشخصی از هر نوع سفر با استفاده از دوچرخه تعیین می‌شود. همچنین با توجه به این‌که استفاده از دوچرخه در زمان محدودی انجام می‌گیرد و مسافران پس از انجام سفر دوچرخه را تحویل می‌نمایند، بنابراین هر دوچرخه در روز به چندین نفر کرایه داده می‌شود. که این تعداد به صورت متوسط و با توجه به زمان استفاده از هر دوچرخه محاسبه می‌شود.

• مدل سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه

در این مرحله به مدل‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه پرداخته می‌شود. به این منظور در ادامه به معرفی متغیرها و پارامترهای مدل و سپس مدل ارائه شده پرداخته می‌شود. در ابتدا به تعریف متغیرهای تصمیم و پارامترها پرداخته می‌شود. پارامترهای مدل به صورت جدول ۱ است.

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_i C_{ij} \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ik} C_{ij} C_{kj} \quad i \neq k \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_i C_{ij} \geq \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \alpha_t P_{tj} \quad (3)$$

$$Q_i \leq U \quad i=1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \leq m \quad (5)$$

$$Q_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad (6)$$

$$C_{ij} \text{ is 0 or 1} \quad i=1, \dots, n \quad ; \quad j=1, \dots, m \quad (7)$$

یک راه‌حل را بهینه گویند در صورتی که توسط سایر راه‌حل‌ها در فضای جستجو مغلوب نگردد [Ehrgott, 1999]. برای شناسایی راه‌حلی به این صورت بایستی ارتباطات صفر و یک را به صورت زیر تعریف نمود. راه‌حل x_a بر x_b مسلط است اگر:

$$x_a < x_b \quad \text{if} \quad f_i(x_b) \leq f_i(x_a); \quad \forall i \\ \exists i \quad \text{for which} \quad f_i(x_a) < f_i(x_b)$$

بهینگی پارتو معمولاً به صورت یک مجموعه جواب در فضای جواب است که توسط دیگر جواب‌ها در فضای جواب مغلوب نمی‌گردد. مجموعه مورد اشاره در بالا را مجموعه "بهینگی پارتو" می‌گویند.

۴-۲ الگوریتم ژنتیک

با توجه به این‌که مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت برنامه‌ریزی چندهدفه مختلط است و همچنین با توجه به تعداد پارامترها و متغیرها، نمی‌توان مسأله را با استفاده از روش‌های سنتی حل نمود و به این منظور بایستی برای حل آن از یکی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده نمود. به همین دلیل در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده می‌شود.

روش الگوریتم ژنتیک مرتب شده نامغلوب (NSGA-II) برای اولین بار توسط دب و همکاران ارائه شد [Deb et al. 2002] و جهت انجام جستجو از روش پارتو استفاده می‌کند. به صورت خلاصه روش NSGA-II به این صورت عمل می‌کند که در ابتدا یک جمعیت P_t تولید می‌شود و در ادامه با بکارگیری عملگرهای ژنتیک جمعیت P_t' ایجاد می‌شود و با ترکیب دو جمعیت P_t و P_t' جمعیت جدید $P_t + P_t'$ ایجاد می‌شود. در ادامه نیز جمعیت‌های تولید شده توسط $P_t + P_t'$ در یک زیرسیستم بر مبنای عدم

در مدل بالا معادله اول نشان می‌دهد که هدف اول شامل $Q_i C_{ij}$ با توجه ضرب دو متغیر نصب ایستگاه و ظرفیت هر ایستگاه، مقدار ظرفیت ایستگاه‌های نصب شده را می‌دهد که در این هدف به دنبال کمینه کردن آن یعنی کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و ظرفیتی است که بایستی در سطح شهر ایجاد و نصب گردد. در رابطه دوم نیز هدف بیشینه کردن فاصله دو ایستگاه i و k که در ناحیه j ایجاد می‌شوند، است. محدودیت‌های مدل نیز به این صورت است که در رابطه سوم که محدودیت اول را نشان می‌دهد تضمین می‌کند که ظرفیت ایستگاه‌های ایجاد شده از میزان سفر انجام شده در آن نواحی بیشتر باشد و با استفاده از این محدودیت می‌توان تضمین نمود که ایستگاه‌های احداث شده کمینه ظرفیت مورد نیاز را تضمین می‌نماید. در رابطه چهارم که محدودیت دوم را نشان می‌دهد تضمین می‌شود که بیشینه ظرفیت ایستگاه‌های ایجاد شده برابر مقدار U باشد. با توجه به این‌که جهت احداث ایستگاه‌های دوچرخه نیز محدودیت‌های مالی و مکانی وجود دارد و نمی‌توان ظرفیت مورد نیاز آن را نامحدود در نظر گرفت با استفاده از این محدودیت می‌توان ظرفیت ممکن را در برنامه‌ریزی در نظر گرفت. در رابطه پنجم، محدودیت چهارم تضمین می‌کند که تعداد کل ایستگاه‌ها بیشینه برابر مقدار m باشد. روابط ۶ و ۷ نیز تضمین می‌کند که متغیر Q_i یک متغیر غیر منفی است و متغیر C_{ij} یک متغیر صفر و یک است.

۴. حل مدل

۴-۱ بهینگی پارتو

استفاده از مفهوم بهینگی پارتو برای تعریف راه‌حل بهینه برای یک مسأله چندهدفه می‌تواند مفید باشد. در روش بهینگی پارتو،

نظر گرفته است. همچنین برای عملگر تقاطع نیز به صورت تصادفی یک جزء از ماتریس‌های جواب انتخاب می‌شود و در ادامه جزء اول آن‌ها با یکدیگر جابجا می‌شود. نرخ تقاطع نیز برابر با ۰,۲ در نظر گرفته شده است. نحوه‌ی جفت‌گیری حاصل از تقاطع به صورت زیر است:

Offspring 1	Parent 2-part 1	Parent 1-part 2
Offspring 2	Parent 1-part 1	Parent 2-part 2

۵. بکارگیری مدل برای مکان‌یابی ایستگاه‌های

دوچرخه شهر اصفهان

با توجه به این‌که معمولاً یکی از مشکلات مردم در کلانشهرها ترافیک و آلودگی هوا است یکی از مواردی که می‌تواند این مشکلات را مرتفع نماید استفاده و ترویج دوچرخه است و این امر نیز به جز برنامه‌ریزی مناسب برای در اختیار قرار دادن دوچرخه به شهروندان برای استفاده در سفرهای درون‌شهری امکان‌پذیر نیست. شهر اصفهان نیز به عنوان یکی از مهم‌ترین کلان‌شهرهای ایران که با مشکل ترافیک و آلودگی هوا مواجه است نیاز به برنامه‌ریزی مناسب برای ایستگاه‌های دوچرخه خود است تا از این طریق بتواند استفاده از دوچرخه را افزایش دهد و از تاثیرات مثبت آن بر ترافیک و آلودگی هوا استفاده نماید. به این منظور در این مرحله از پژوهش، مدل ارائه شده در قسمت سوم برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه شهر اصفهان اجرا می‌شود. به این منظور به جمع‌آوری داده‌های هر یک از پارامترهای مدل پرداخته می‌شود. به این منظور مفروضات مدل به صورت زیر می‌باشد:

- تعداد نواحی ترافیکی که مدل به دنبال پوشش دادن مسافر آن‌ها می‌باشد برابر ۱۷۵ ($i=1,2,\dots,175$) است.
- تعداد مکان‌هایی که برای احداث ایستگاه در نظر گرفته شده است برابر ۷۵ است ($i=1,2,\dots,84$).

تسلط مرتب می‌شود. در این الگوریتم، تمام راه‌حلی‌هایی که دارای میزان عدم تسلط برابر می‌باشند در یک رتبه قرار می‌گیرند و جمعیت‌هایی که دارای مقدار عدم تسلط (در برابر جمعیت‌های دیگر مغلوب هستند) پایینی هستند در رتبه‌های پایینی قرار می‌گیرند. جمعیت P_{t+1} برای تکرار بعدی به عنوان یک راه‌حل در نظر گرفته می‌شود و از $P_t + P'_t$ بدست می‌آید و دارای رتبه بالاتری است. بنابراین الگوریتم NSGA-II از مکانیزم فاصله بین جمعیت‌ها استفاده می‌کند و سعی می‌کند با اندازه‌گیری فاصله ازدحام بین جمعیت‌ها، به اندازه‌گیری پراکندگی راه‌حل‌ها بپردازد [Arabzad et al. 2014].

۴-۲-۱ راه‌حل کدنویسی

جهت کدنویسی مدل ارائه شده، دو ماتریس در نظر گرفته شده است که یک ماتریس صفر و یک C که نشان‌دهنده این است که ایستگاه احداث شده در ایستگاه i مکان j را پوشش می‌دهد و همچنین یک ماتریس Q که نشان‌دهنده ظرفیت هر ایستگاه می‌باشد.

۴-۲-۲ عملگرهای ژنتیک

با توجه به دب و همکاران [Deb et al. 2002]، الگوریتم تکاملی که برای مسائل چندهدفه استفاده می‌شود به دو مورد نیاز دارد:

۱. همگرایی به مرز پارتو و پیدا کردن مجموعه‌ای از جواب‌های یکنواخت در مرز پارتو
۲. ایجاد مکانیزمی برای انتخاب راه‌حل مناسب که بایستی از عملگرهای ژنتیک استفاده نمود.

برای هر دو راه‌حل، راه‌حل غالب برای جفت‌گیری انتخاب می‌شود و در مواردی که هر دو راه‌حل غالب می‌باشند، راه‌حلی انتخاب می‌شود که در یک منطقه با ازدحام یا چگالی کمتری باشد. این میزان چگالی را می‌توان با استفاده از فاصله ازدحام ارزیابی نمود. برای عملگر جهش به صورت تصادفی یک جزء از ماتریس جواب انتخاب می‌شود و نرخ جهش نیز برابر با ۰,۱ در

ناحیه ترافیکی از ۸۴ مکانی که برای احداث ایستگاه قرار داده شده بود به صورت فاصله مستقیم یا فاصله اقلیدسی تعیین می‌شود. در ادامه برای بدست آوردن میزان بهینگی پارتو به صورت تقریبی از روش بهینه‌سازی NSGA-II استفاده می‌شود و اندازه جمعیت برابر با ۵۰، تعداد تکرار برابر با ۱۱۰، نرخ جهش برابر با ۰٫۱ و نرخ تقاطع برابر با ۰٫۲ در نظر گرفته شده است. در ادامه الگوریتم روش بهینه‌سازی NSGA-II با استفاده از نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شد. الگوریتم NSGA-II این امکان را دارد که به سرعت به جستجوی راه حل‌های پارتو پردازد و در نهایت یک جواب نزدیک به بهینه برای مسأله ارائه نماید. شکل ۲ مرز پارتو را نشان می‌دهد که توسط الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است و شامل هشت دسته جواب است که در جداول ۳ تا ۱۰ جواب هر یک از آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱. مکان‌مند نمودن محل‌های کاندید برای احداث دوچرخه با استفاده از GIS

• پیشینه ظرفیت دوچرخه برای هر ایستگاه برابر ۵۰ می‌باشد ($u=50$).

مفروض سوم مدل مبنی بر در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی برای تعیین فاصله، با توجه به این‌که مطالعه موردی در اصفهان انجام شده است و نوع شهرسازی اصفهان بگونه‌ای هست که بیشتر خیابان‌ها موازی و عمود بر هم هستند با در نظر گرفتن نظرات خبرگان در شهرداری اصفهان از فاصله اقلیدسی استفاده شد. همچنین ضرایب α_t نیز به صورت جدول ۲ محاسبه می‌شود.

جدول ۲. مقادیر ضریب α_t

t	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
α_t	۰/۲۱۱	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵	۰/۲۳۷	۰/۱۸۴	۰/۱۳۲	۰/۰۲۶

در ادامه نواحی ترافیکی برای شهر اصفهان تعیین شد و این شهر به ۱۷۵ ناحیه ترافیکی تقسیم شده است. در ادامه با استفاده از نمونه‌گیری آماری در هر یک از نواحی ترافیکی، میزان سفری که در هر ناحیه انجام می‌گیرد، تعیین می‌شود. در ادامه نیز با نظر خواهی از خبرگان حمل و نقل، اطلاعات آماری و همچنین اطلاعات شهرهای دیگر، ضریب استفاده از دوچرخه تعیین می‌شود که برابر ۱ درصد از کل سفرهای شهری خواهد بود. همچنین با توجه به این‌که میزان استفاده از هر دوچرخه کرایه داده شده توسط شهروندان متفاوت است به صورت متوسط هر دوچرخه در روز به ۱۰ نفر کرایه داده می‌شود. بنابراین میزان سفر در هر ناحیه ترافیکی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{تعداد سفر ناحیه ترافیکی } t \text{ با دوچرخه} = \frac{0.01 \times \text{تعداد کل سفر}}{10}$$

در ادامه ۸۴ مکان که پتانسیل احداث ایستگاه دوچرخه را دارند، تعیین می‌شود که با استفاده از روش‌های GIS مکان هر یک از آن‌ها به صورت مکانمند بر روی نقشه تعیین شده است که در شکل (۱) نشان داده می‌شوند. همچنین میزان فاصله مراکز ۱۷۵

Q ₆₈	۳۸	Q ₂₂	۲۵	Q ₃₅	۲۸
Q ₁₉	۱۹	Q ₆₅	۳۲	Q ₇₃	۱۶

جدول ۷. جواب پنجم غیر مغلوب

Z ₁	۲۵۷۸	Z ₂	۲۵۷۸۳۴۳۸		
Q ₁₃	۱۶	Q ₁₅	۴۰	Q ₆₃	۱۰
Q ₅₁	۲۷	Q ₈	۲۴	Q ₁₇	۳۲
Q ₃₀	۱۳	Q ₅	۱۵	Q ₆₉	۱۹
Q ₇₁	۴۲				

جدول ۸. جواب ششم غیر مغلوب

Z ₁	۲۱۲۳	Z ₂	۲۶۷۲۳۵۱۵		
Q ₅₄	۲۹	Q ₇₂	۲۴	Q ₃₂	۱۱
Q ₄₀	۳۴	Q ₁	۲۸	Q ₃₇	۱۴
Q ₂₉	۱۲	Q ₃₅	۳۲	Q ₇₉	۴۱
Q ₂₃	۹	Q ₄	۳۰	Q ₅₂	۲۷
Q ₁	۱۷	Q ₂₆	۱۶		

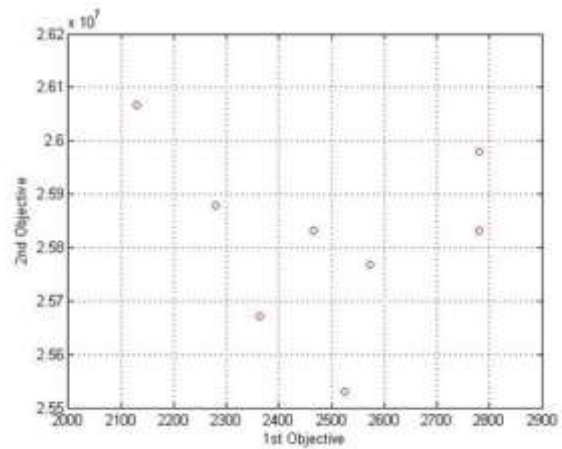
جدول ۹. جواب هفتم غیر مغلوب

Z ₁	۲۷۸۷	Z ₂	۲۵۸۳۱۷۰۶		
Q ₃₄	۳۰	Q ₅	۱۹	Q ₁₆	۱۹
Q ₂₇	۱۸	Q ₅₈	۱۳	Q ₄₃	۲۵
Q ₁₉	۲۶	Q ₁₅	۴۳	Q ₉	۷
Q ₇₉	۱۸				

جدول ۱۰. جواب هشتم غیر مغلوب

Z ₁	۲۲۸۹	Z ₂	۲۵۸۸۰۲۹۸		
Q ₃₄	۲۶	Q ₁₅	۱۷	Q ₁₆	۸۱
Q ₂₇	۱۳	Q ₂₈	۹	Q ₄₇	۴۶
Q ₃₉	۲۷	Q ₆₅	۳۲	Q ₆₉	۳۷

همانگونه که در جداول فوق نشان داده می‌شود، در جواب‌های اول، سوم، چهارم و هشتم تعداد نه ایستگاه با ظرفیت‌های



شکل ۲. جواب بهینگی پارتو

جدول ۳. جواب اول غیر مغلوب

Z ₁	۲۵۱۹	Z ₂	۲۵۵۳۸۷۲۱		
Q ₈	۱۸	Q ₂₆	۱۴	Q ₁₅	۱۵
Q ₃₁	۳۶	Q ₄₀	۲۷	Q ₂₉	۱۲
Q ₁₃	۱۹	Q ₅₇	۲۳	Q ₅₄	۱۷

جدول ۴. جواب دوم غیر مغلوب

Z ₁	۲۷۹۱	Z ₂	۲۵۹۴۳۶۹۲		
Q ₄	۸	Q ₈₁	۴۳	Q ₂₇	۲۱
Q ₂₁	۱۹	Q ₃₇	۳۵	Q ₄	۱۹
Q ₅₉	۳۶	Q ₁₆	۱۵	Q ₄₆	۷
Q ₆₂	۲۴	Q ₉	۳۰	Q ₆	۲۱

جدول ۵. جواب سوم غیر مغلوب

Z ₁	۲۳۶۲	Z ₂	۲۵۶۷۵۶۱۲۵		
Q ₁₄	۲۶	Q ₅	۷	Q ₁₆	۸
Q ₂₀	۱۲	Q ₈	۱۳	Q ₄₇	۴۱
Q ₄₉	۱۷	Q ₅₅	۲۵	Q ₆₉	۲۵

جدول ۶. جواب چهارم غیر مغلوب

Z ₁	۲۴۶۷	Z ₂	۲۵۸۳۴۱۰۹		
Q ₁₁	۷	Q ₅₈	۱۵	Q ₂₆	۳۰

II هشت جواب غیر مغلوب بدست می‌آید که تصمیم‌گیرنده می‌تواند با استفاده از آن به تصمیم‌گیری بپردازد. از مزایای مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش این است که علاوه بر مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه، به صورت همزمان ظرفیت آن‌ها را نیز در بر می‌گیرد و اهداف آن نیز بر خلاف اکثر پژوهش‌های مشابه به صورت مستقیم بر کاهش هزینه‌ها تمرکز ندارد و سعی در کاهش تعداد و ظرفیت ایستگاه‌ها می‌کند و علاوه بر آن نیز به دنبال بیشینه‌سازی فاصله ایستگاه‌ها است. علاوه بر آن در این پژوهش به تعداد سفر انجام شده در هر ناحیه ترافیکی توجه شده است که باعث می‌شود مکان‌یابی بر مبنای نیاز مسافران انجام گیرد و به دنبال پاسخگویی به تقاضای سفر باشد. این پژوهش علاوه بر مزایایی که دارد دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به استفاده از یک الگوریتم برای حل آن اشاره نمود و همچنین به شعاع پوشش ایستگاه‌ها نیز در مدل توجه نشده است. پژوهشگران آتی در این زمینه می‌توانند در پژوهش‌های خود مدل ارائه شده را با چندین الگوریتم فراابتکاری حل نموده و جواب‌ها را با یکدیگر مقایسه نمایند. علاوه بر این می‌توانند به ارائه‌ی مدل‌های ریاضی در حالت پیوسته و با در نظر گرفتن شعاع پوشش ایستگاه‌ها بپردازند. یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش نیز استفاده از فاصله اقلیدسی برای تعیین فاصله بین ایستگاه‌ها بود که می‌توان در پژوهش‌های آتی بر مبنای نوع مطالعه‌ی موردی از روش‌های دیگری نیز برای محاسبه فاصله استفاده نمود. علاوه بر آن در مدل ارائه شده نیز می‌توان از برخی محدودیت‌های دیگر نیز بر مبنای مطالعه موردی استفاده نمود.

۷. مراجع

- آل‌نوری، هومن، مشکانی، سید مهدی، صفارزاده، محمود و شرافتی‌پور سعید (۱۳۹۳) "مکان‌یابی دوربین‌های ورودی محدوده زوج و فرد با رویکرد پوشش بیشینه تخلیفات"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل. سال ششم، شماره دوم، ص. ۱۸۱-۱۹۶.

- احدی، حمیدرضا، قاسمی صاحبی، منان و ذاکری سردرودی، جبارعلی (۱۳۹۲) "اولویت‌بندی روش‌های حمل و نقل عمومی در

مشخص شده تاسیس می‌گردد، درحالی که در جواب ششم و هفتم تعداد ۱۰ ایستگاه و در جواب دوم نیز تعداد ۱۲ ایستگاه نصب می‌گردد. همان‌گونه که در جواب‌های بدست آمده مشخص است در جواب ششم مقدار تابع هدف اول برابر با ۲۱۲۳ بوده و با توجه به اینکه به دنبال کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و ظرفیت آن‌هاست، از بقیه جواب‌ها بهتر است. علاوه بر آن در جواب میزان بهتری را نسبت به جواب اول دارد و همچنین در هدف دوم که به دنبال بیشینه کردن فاصله ایستگاه‌های یک ناحیه ترافیکی است، نیز جواب ششم دارای بالاترین مقدار نسبت به سایر جواب‌ها است. به عبارتی دیگر تصمیم‌گیرنده می‌تواند با انتخاب جواب ششم به میزان بیشتری تعداد و ظرفیت ایستگاه‌ها را کاهش دهد و همچنین پراکندگی را نیز افزایش دهد.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش آلودگی‌های هوا و همچنین گرم شدن زمین، لزوم استفاده از حمل و نقل پاک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. یکی از ابزارهای حمل و نقل پاک که بسیار مورد توجه برنامه‌ریزان شهری است، استفاده دوچرخه به عنوان وسیله حمل و نقل است. استفاده هر چه بیشتر از دوچرخه در شهر باعث ایجاد یک پویایی پایدار در شهر می‌شود و علاوه بر منافع اجتماعی آن همچون پایداری زیست محیطی و اقتصادی و عدالت اجتماعی، دارای منافع بسیاری نیز در سطح فردی است. علاوه بر آن با استفاده از دوچرخه می‌توان بر شادابی جامعه نیز افزود و در راستای ایجاد شهری بانشاط از آن استفاده نمود. با توجه به اهمیت ایجاد دوچرخه در شهرها، در این پژوهش به ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه و تعیین ظرفیت آن‌ها پرداخته شده است و سپس نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II به حل مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

در ادامه نیز برای بررسی قابلیت اجرایی مدل پیشنهادی، با استفاده از آن به مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه در شهر اصفهان پرداخته شده است. نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه شهر اصفهان، نشان داد که با استفاده از روش NSGA-

- Dill, J. and Voros, K. (2007) "Factors affecting bicycling demand: Initial survey findings from the Portland region", Washington, DC: Transportation Research Board.
- Ehr Gott, M. (1999). "Multicriteria optimization", 2nd Ed., Berlin: Springer.
- Froehlich, J., Neumann, J. and Oliver, N. (2008) "Measuring the pulse of the city through shared bicycle programs", Urban Sense 08, Raleigh, NC, USA.
- García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J. and Latorre, M. (2012) "Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach". Applied Geography, Vol. 35, No. 1, pp. 235-246.
- Heinen, E., van Wee, B. and Maat, K. (2010) "Commuting by bicycle: An overview of the literature", Transport Reviews, Vol. 30, No. 1, pp. 59-96.
- Jensen, P., Rouquier J. B., Ovtracht, N., Robardet, C. (2010) "Characterizing the speed and paths of shared bicycle use in Lyon", Transportation Research - Part D: Transport and Environment, Vol. 15, No. 8, pp. 522-524.
- Martens, K. (2007) "Promoting bike and ride: the Dutch experience", Transportation Research - Part A: Policy and Practice. Vol. 41, No. 4, pp. 326-338.
- Midgley, P. (2011) "Bicycle-sharing schemes: Enhancing sustainable mobility in urban areas". Background Paper No. 8, CSD19/2011/BP8, Commission on Sustainable Development, United Nations.
- Lin, J. R. and Yang, T. H. (2011) "Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints", Transportation Research - Part E: Logistics and Transportation Review. Vol. 47, No. 2, pp. 284-294.
- Romero, J. P., Moura, J. L., Ibeas, A. and Benavente, J. (2012) "Car-bicycle combined model for planning bicycle sharing systems". Transportation Research Board. Paper #12-3062.
- شهر تهران به منظور اصلاح نظام تخصیص بودجه". فصلنامه مهندسی حمل و نقل. سال چهارم، شماره سوم، ص. ۱۹۷-۲۰۸.
- ممدوحی، امیررضا و امینی، وجیهه (۱۳۹۳) "یک تحلیل از تأثیر سطح عرضه بر میزان استفاده از دوچرخه در سفرهای کاری و تحصیلی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل. سال ششم، شماره دوم، ص. ۳۴۱-۳۵۴.
- Arabzad, S. M., Ghorbani, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014) "An evolutionary algorithm for a new multi-objective location-inventory model in a distribution network with transportation modes and third party logistics providers". *International Journal of Production Research*. Vol. 53, No. 4, pp. 1038-1050.
- Bonnette, B. (2007) "The implementation of a public-use bicycle program in Philadelphia". *Urban Studies Program. Senior Seminar Papers*. Pennsylvania University.
- Büttner, J., Mlasowsky, H., Birkholz, T., Groper, D., Fernandez, A. C., Emberger and Banfi, M. (2011) "Optimising Bike Sharing in European Cities: A Handbook", Intelligent Energy Europe program (IEE). <http://obisproject.com>. Accessed Feb. 13, 2012.
- Caggiani, L. and Ottomanelli, M. (2013) "A dynamic simulation based model for optimal fleet repositioning in bike-sharing systems". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 87, No. 1, pp. 203 – 210.
- Contrado, C., Morenci, C. and Rousseau, L.-M. (2012) "Balancing a dynamic public bike-sharing system", <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2012-09.pdf>. Accessed Mar. 20, 2012.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGAI." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 181-197.

- Shu, J., Chou, M., Liu, Q., Teo, C. P. and Wang, I. L. (2010) "Bicycle-sharing system: Deployment, utilization and the value of re-distribution". Singapore: National University of Singapore- NUS Business School. <http://www.bschool.nus.edu.sg/Staff/bizteocp/BS2010.pdf>.

- Stinson, M. A. and Bhat, C. R. (2003) "An analysis of commuter bicyclist route choice using a stated

preference survey", Transportation Research Board. Paper #03-3301.

- Zahedian-Tejenaki, Z. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015) "A Fuzzy bi-objective mathematical model for sustainable hazmat transportation". International Journal of Transportation Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 231-243.

رضا توکلی مقدم، محمد مهدی توکلی، محمد جابری

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 سوین برن - استرالیا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم های صنعتی (مکان یابی و استقرار تسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمان بندی و توالی عملیات، الگوریتم های فراابتکاری در بهینه سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.



محمد مهدی توکلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد اخذ نمود و در سال ۱۳۹۲ در مقطع دکتری رشته مهندسی صنایع شروع به تحصیل کرد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحقیق در عملیات، تصمیم گیری با معیارهای چندگانه، مدیریت کیفیت و مدیریت منابع است.



محمد جابری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته فناوری اطلاعات را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود و در سال ۱۳۹۲ در مقطع دکتری رشته مهندسی صنایع شروع به تحصیل کرد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان شبکه عصبی، زمان بندی پروژه، تحقیق در عملیات و سیستم های اطلاعات مدیریت است.

