Determining the Optimal Combination of Urban Transportation Modes

Narjes Khatoon Pakdaman[1], Babak Saffari*[2], Kamran Kianfar[3]

1. Master of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Iran, pakdaman.narges1@gmail.com

2. Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Iran, b_safari@ase.ui.ac.ir

3. Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran, k.kianfar@eng.ui.ac.ir

Received: 2021/04/04 Accepted: 2022/05/13

Abstract

The performance of urban transportation modes is a critical issue for people's mobility. This research analyses various transportation modes in Isfahan city, focusing on social cost minimization and comfort maximization. This study aims to determine the optimal combination of urban transportation modes by considering the appropriate comfort level in Isfahan. The study's results indicate that different allocation models are suitable for different cost-comfort combinations cases. All of these combinations, called Pareto points, are optimal and one of these points can be selected according to the policy-maker opinion. The input data are based on data of origin-destination obtained from the Deputy of Transportation and Traffic of Isfahan Municipality between 189 traffic areas. This data is reduced to 44 integrated areas for the sake of simplicity. The model used in this research is a bi-objective linear programming model. In this research, GAMS software is used for modeling, ArcGIS software is used for data mining, and finally, Excel and SPSS have been applied to analyze the results.

JEL Classification: C61, P25, R42

Keywords: Optimization, Urban Economics, Transportation Planning

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

*. Corresponding Author, Tel: 09133197947

تحقیقات اقتصادی (نشریه علمی) / دوره ۵۶، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۰/ ص ۷۲۷-۷۰۳

تعیین ترکیب بهینه‌ی مدهای حمل‌ونقل شهری

DOI: 10.22059/jte.2022.321390.1008451

نرجس خاتون پاکدامن[۱]، بابک صفاری*[۲]، کامران کیانفر[۳]

۱. کارشناسی ارشد گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، pakdaman.narges1@gmail.com

۲. استادیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، ایران، b_saffari@ase.ui.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، ایران، k.kianfar@eng.ui.ac.ir

نوع مقاله: علمی-پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴

چکیده

عملکرد مطلوب روش‌های مختلف حمل‌ونقل شهری یک موضوع حیاتی برای جابه‌جایی شهروندان است. هر یک از این روش‌ها به دلیل ویژگی‌های خاص از اولویت‌بندی متفاوتی برخوردار است و لازم است به‌کارگیری و توسعه آن‌ها متناسب با خصوصیات این روش‌ها و شرایط شهر صورت گیرد. در مقاله‌ی حاضر مسئله، تخصیص مدهای مختلف حمل‌ونقل شهری به تقاضاهای موجود از هر مبدأ به هر مقصد می‌باشد، به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه‌ی اجتماعی به سیستم تحمیل شود. هدف از انجام این تحقیق، تعیین ترکیب بهینه‌ای از سیستم حمل‌ونقل شهری با در نظر گرفتن سطح مناسبی از راحتی در شهر اصفهان است. نتایج حاکی از آن است که در حالت‌های مختلف ترکیب هزینه و راحتی، مدل تخصیص‌های متفاوتی را ارائه می‌دهد. تمامی این ترکیب‌ها که نقاط پارتو می‌باشند بهینه هستند که با توجه به نظر سیاست‌گذار، هریک از این نقاط می‌تواند جهت اجرای سیاست‌های حمل‌ونقل انتخاب شود. داده‌های استفاده شده در این پژوهش بر اساس داده‌های مبدأ- مقصد اخذ شده از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری اصفهان بین ۱۸۹ محدوده ترافیکی بوده و به‌منظور تسهیل در تخصیص مدهای بهینه به داده‌های مبدأ - مقصد با تجمیع نواحی همگن بین نواحی تجمیعی ۴۴ گانه تقلیل یافته است. مدل مورد استفاده در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی دو هدفه می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار گمز جهت مدل‌سازی، از نرم‌افزار ArcGIS به‌منظور داده-کاوی و از نرم‌افزارهای Excel و SPSS جهت تحلیل نتایج استفاده شده است.

طبقه‌بندی JEL: R42, P25,C61

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، اقتصاد شهری، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، حمل و نقل شهری

---

*. نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۳۳۱۹۷۹۴۷

۱- مقدمه

در جوامع امروزی، بسیاری از کلان‌شهرها با معضل ترافیک بالا در حمل‌ونقل شهری مواجه هستند. رشد روزافزون جمعیت، مشکل حمل‌ونقل را به یکی از اصلی‌ترین مسائل شهر تبدیل کرده است (اتو[1]، ۲۰۱۰). اگـــر بپذیریم کلان‌شهرها نقش اساسی در اقتصاد کشورها بازی می‌کنند، آنگاه شبکه حمل‌ونقل است که این نقش را کارآمد نگه می‌دارد. در مقابل، ناکارآمدی سیستم حمل‌ونقل شهری عوارض جدی محیطی همانند آلودگی هوا و پیامدهای منفی اجتماعی و اقتصادی را به دنبال خواهد داشـــت و سبب ناکارآمدی عملکرد شهر را سبب می‌شود (الدیرابی و ابدوالهال[2]، ۲۰۰۵). سیستم حمل‌ونقل یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر اقتصاد می‌باشد و سلامت اجتماعی و اقتصادی یک منطقه شهری تا حد زیادی به عملکرد سیستم حمل‌ونقل آن وابسته است (اولنجین و اونسل[3]، ۲۰۱۰). حمل‌ونقل نقش عمده‌ای در آلایندگی محیط زیست شهری دارد و درصد قابل توجه‌ای از آلایندگی هوا در شهرها به‌دلیل سوختن بنزین در خودروها می‌باشد (فلسن و فیرمن[4]، ۲۰۱۲). باتوجه به اینکه وسایل حمل‌ونقل مختلف داری مزایا، معایب و خصوصیات منحصر به فرد متفاوتی می‌باشند، هر کدام برای نوعی از حمل‌ونقل شهری مناسب و مقرون به صرفه هستند؛ بنابراین در شرایط مختلف، باید تلاش شود بهترین گزینه‌ی ممکن انتخاب گردد. در مناطق شهری انتخاب از میان مدهای مترو، اتوبوس تندرو (BRT)، اتوبوس شهری، تاکسی، خودروی شخصی، دوچرخه می‌باشد که می‌توانند مکمل یکدیگر باشند. در این پژوهش مسئله، تخصیص مدهای مختلف حمل‌ونقل به تقاضاهای موجود، از مبدأهای داخل شهر اصفهان به مقاصد مختلف داخل شهر اصفهان می‌باشد، به‌گونه‌ای که با در نظر گرفتن زمان سفر، طول مسیر و هزینه‌های سیستمی مدهای مختلف، وسیله‌ی نقلیه‌ای به تقاضاهای موجود تخصیص داده شود که هزینه‌های اجتماعی به حداقل میزان ممکن تقلیل یابد. با توجه به اینکه میزان راحتی استفاده از مدهای مختلف حمل و نقل متفاوت می‌باشد، چگونگی تخصیص هریک از مدها با افزایش سطح راحتی، مورد بررسی قرار گرفته است تا ترکیب‌های مختلف از میزان حداقل هزینه با در نظر گرفتن سطوح مختلف راحتی حاصل شود و جهت سیاست‌گذاری استفاده گردد.

---

1. Otto
2. El-Dirab & Pramod
3. Ülengin & Önsel
4. Fellesson & Friman

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدل‌سازی مطالعات و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در ۴ مرحله انجام می‌شود که این مدل‌ها، مدل‌های چهار مرحله‌ای نامیده می‌شوند. شکل زیر روند این مدل‌ها در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. این مراحل عبارتند از: ۱- تولید و جذب سفر ۲-توزیع سفر ۳- تفکیک سفر ۴- تخصیص سفر (مونتیرو[1]، ۲۰۱۴).

روند مدل‌های ۴ مرحله‌ای در برنامه‌ریزی حمل و نقل (مونتیرو، ۲۰۱۴)

۱- تولید سفر: برنامه‌ریزان حمل‌ونقل در این مرحله مقادیر سفرهای تولید و جذب شده‌ی هر ناحیه را محاسبه، پیش‌بینی و مدل‌سازی می‌کنند. این مراحل غالباً به دو روش ساخت مدل‌های رگرسیون خطی و روش دسته‌بندی ضربدری[2] در مطالعات حمل‌ونقل صورت می‌گیرد. هر دو روش بر مبنای اطلاعات کسب شده از آمارگیری مبدأ-مقصد کار می‌کنند.

۲- *توزیع سفر:* پس از پیش‌بینی مقادیر سفرهای تولید و جذب شده‌ی هر ناحیه، ماتریس سفرها پیش‌بینی می‌شود. در این مرحله برنامه‌ریز با استفاده از روش‌هایی تعیین می‌کند که از کل سفرهای ایجاد شده، چه تعداد سفر از هر ناحیه مانند i به هر ناحیه مانند j صورت می‌گیرد.

1. Monteiro
2. Cross Classification

۳- *تفکیک سفر:* در سومین مرحله از فرآیند پیش‌بینی تقاضای سفر، نحوه‌ی تصمیم‌گیری مردم در مورد انتخاب وسیله‌ی سفر (اتومبیل، اتوبوس، مترو و ...) بررسی می‌شود. این مرحله ممکن است پیش از توزیع سفر صورت می‌گیرد؛ اما غالباً مدل‌های انتخاب وسیله، در مرحله‌ی سوم تحلیل تقاضای سفر ساخته می‌شوند؛ زیرا داشتن اطلاعات درباره‌ی مقصد سفرها سبب می‌شود تا با معلوم بودن ویژگی‌های سفر بین هر مبدأ و مقصد (نظیر زمان سفر، هزینه و ...)، عوامل مؤثر بر انتخاب افراد، در نظر گرفته شده و مدهای مختلف سیستم حمل‌ونقل دقیق‌تر با یکدیگر مقایسه شوند.

۴- *تخصیص مسیر:* هدف نهایی برنامه‌ریز حمل‌ونقل از تحلیل تقاضا، پیش‌بینی نحوه‌ی استفاده‌ی افراد از شبکه‌ی حمل‌ونقل می‌باشد. در این صورت برنامه‌ریز قادر است چگونگی استفاده از شبکه‌ی حمل‌ونقل را در حال، محاسبه و در آینده پیش‌بینی و در نهایت نتایج اجرای سیاست‌ها را برای آینده تعیین و تفسیر نماید.

۲-۱- برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری

حمل‌ونقل عبارت است از حرکت و جابه‌جایی مردم و کالاها بین نقاط مختلف داخل شهر و بین شهرها (اتو، ۲۰۱۰). کلمه‌ی حمل‌ونقل به حمل چیزی یا کسی از جایی به‌جای دیگر، یا همان عمل حمل کردن، یا به عملی که در آن مسافرین، کالاها یا مواد جابه‌جا می‌شوند، گفته می‌شود (جیون و آمکودزی[1]، ۲۰۱۳). سیاست‌ها، پروژه‌ها و شیوه‌های حمل‌ونقل اثرات زیادی بر کاربری زمین، کیفیت هوا، درآمد و زمان سفر، دسترسی به خدمات و کیفیت کلی شهرها دارد. افزون بر این، آن‌ها اثرات بلند مدتی بر مسیر رشد شهرها در آینده دارند (ناصرالدین و اسکندری[2]، ۲۰۱۷). بر اساس گزارش‌های بانک جهانی، حدود ۲۵٪ تا ۵۰٪ از آلودگی‌های مؤثر بر گرمایش جهانی در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه، از طریق بخش حمل‌ونقل، منتشر می‌شود. (لای و چن[3]، ۲۰۱۱). اثرات نامطلوب مربوط به شیوه‌ی حمل‌ونقل تهدیدی مهم برای اجتماع است که به شکل‌هایی همچون مرگ و میر، تصادفات، آلودگی هوا، آلودگی صوتی و استرس مشاهده می‌شود (جانسون[4]، ۲۰۰۸). برای کاهش هزینه‌ی اجتماعی سفر که شامل مجموع هزینه‌های پرداختی توسط استفاده‌کنندگان و ارائه‌دهندگان

1. Jeon & Amekudzi
2. Nassereddine & Eskandari
3. Lai & Chen
4. Jonsson

می‌شود، لازم است به نحو مؤثری در اتخاذ تصمیمات و سیاست‌گذاری در مورد سیستم‌های حمل‌ونقل تلاش شود. به‌طورکلی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری از تعیین بهینه میزان استفاده از مدهای حمل و نقل بین نواحی مختلف شهری آغاز شده و به توسعه زیرساخت‌ها و فرهنگ‌سازی در جهت دستیابی به بهینه‌های انتخاب شده منتهی می‌شود. پایش و استمرار در اخذ نتایج و کاربست آنها در تصمیمات بعدی یک الزام ساختاری در این حوزه به شمار می‌رود.

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری یک مسئله‌ی ضروری برای تمام کشورها، از جمله کشورهای توسعه یافته و کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌رود. ازآنجاکه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل برای بهبود سه عامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی از طریق کنترل معیارهای هزینه، زمان و آلودگی هوا می‌تواند به حمل‌ونقل پایدار شهر کمک کند، بسیار پراهمیت است. همچنین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری در رضایت شهروندان نقش به‌سزایی را دارا می‌باشد. از این‌رو دولت و شهرداری در تلاش هستند تا از طریق برنامه‌ریزی مناسب، رضایت شهروندان را کسب کنند. (ورما و رامایانا[1]، ۲۰۱۴). بسیاری از شهرهای بزرگ و پرجمعیت از آلودگی هوا، ازدحام و عدم زیرساخت مناسب و تأخیر در سفرهای درون شهری، به‌ویژه در ساعات اوج رنج می‌برند. این مشکلات نه‌تنها به دلیل عدم وجود امکانات کافی در شهرها، بلکه به‌دلیل عدم تشخیص درست منابع و ضعف در برنامه‌ریزی شهری به‌شمار می‌رود. حمل‌ونقل شهری یک زیرساخت مهم اساسی برای رشد شهر و پایداری آن می‌باشد (ورما و رامایانا، ۲۰۱۴). برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری، در این سال‌ها در پاسخ به مسائل، شرایط و ارزش‌ها و درک بیشتر پدیده‌های حمل‌ونقل شهری تکامل یافته است. سال‌ها طول کشید تا اصطلاحات در برنامه‌ریزی شهری به تکامل برسند (ورما و رامایانا، ۲۰۱۴).

۲-۲- *پیشینه پژوهش*

پیشینه پژوهش حاضر در دو حوزه مطالعات داخلی و پژوهش‌های خارجی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. شیرزادی بابکان و طالعی (۱۳۹۲)، در مقاله‌ای با عنوان "انتخاب وسیله‌ی حمل‌ونقل عمومی در یک کریدور شهر"، انتخاب بهترین وسیله را با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و سامانه‌ی اطلاعات مکانی (GIS) مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش بیست شاخص تحت هفت دسته‌ی کلی معیار

1. Verma & Ramanayya

هزینه، زمـان، انعطاف‌پذیری، قابلیـت اعتمـاد، راحتـی و امنیت، آلودگی و خصوصیات وسیله و چهار گزینه‌ی حمل‌ونقل عمومی اتوبوس، اتوبـوس تنـدرو، تاکسـی و متـرو انتخـاب شـده‌اند و در نهایت از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) برای تعیین وزن نهایی معیارها و از روش TOPSIS برای اولویت‌بندی گزینه‌های پیشنهادی حمل‌ونقل عمومی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی گزینـه‌هـای اتوبـوس تنـدرو، متـرو، اتوبـوس و تاکسی، به‌ترتیب حائز بیشترین امتیاز جهت توسعه حمل‌ونقل عمومی در کریدور مورد مطالعه می‌باشند. برادران و آذری‌خواه (۱۳۹۷)، در مقاله‌ای با عنوان "ارائه‌ی مدل چند هدفه مسیریابی در شبکه سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی درون شهری"، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با سه تابع هدف را ارائه کرده‌اند. اهداف مدل، حداقل کردن هزینه، زمان سفر و تعداد تغییر وسایل نقلیه می‌باشد که از دو الگوریتم دقیق و فراابتکاری (الگوریتم مورچگان) استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که حل مسائل با روش دقیق، برای مسائل با بیش از ۱۵ گره غیرکارا است. ده چشمه و مهدوی (۱۳۹۸)، در مقاله‌ای با عنوان "برنامه‌ریزی استراتژیک بهبود جایگاه سیستم حمل‌ونقل شهری در شهرکرد"، نقاط ضعف و قدرت سیستم حمل‌ونقل شهرکرد را بررسی کرده و سپس با استفاده از ماتریس عوامل داخلی و خارجی جایگاه و موقعیت سیستم حمل‌ونقل را مشخص کرده‌اند. در نهایت با استفاده از ماتریس کمّی برنامه‌ریزی راهبردی به اولویت‌بندی راهبردهای پیشنهادی پرداخته‌اند.

البرت[1] و همکاران (۲۰۲۰)، در مقاله‌ای با عنوان "برنامه‌ریزی و طراحی شبکه تاکتیکی در حمل‌ونقل چندوجهی"، وضعیت فعلی تحقیقات از سال ۲۰۰۸ در مورد دسته‌بندی خاص آن مدل‌ها را با یک ادبیات سیستماتیک خلاصه کرده‌اند. جریان‌های تحقیقاتی بر روی مدل‌های قطعی و تصادفی (شامل تقاضای نامشخص، زمان‌های حمل‌ونقل، هزینه‌ها و ظرفیت‌ها) مقایسه می‌شوند. در نهایت گنجاندن بیش‌تر جنبه‌های زیست‌محیطی و کاربرد بیش‌تر شبیه‌سازی به‌عنوان راه حل معرفی شده‌اند.

یو[2] و همکاران (۲۰۲۰)، در مقاله‌ای با عنوان "مسیریابی بهینه سیستم‌های تحرک چندوجهی با اشتراک سواری"، ترکیبی از خدمات حمل‌ونقل عمومی و اشتراک‌گذاری را در نظر گرفته و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل چندوجهی فرموله کرده‌اند. در نهایت با یک رویکرد اکتشافی این نتیجه

1. Elbert
2. Yu

حاصل شده است که الگوریتم مبتنی بر زاویه (AC) در هر دو تنظیمات کوچک و بزرگ به خوبی کار می‌کند. همچنین نشان داده‌اند که سیستم حمل‌ونقل چندوجهی با اشتراک سواری می‌تواند مزایای قابل توجهی در مسافت‌های سفر و زمان سفر داشته باشد. گوپتا و مهلاوات[1] (۲۰۱۸)، در مقاله‌ای با عنوان "یک مدل بهینه‌سازی AHP-DEA چند منظوره برای حمل‌ونقل پایدار در صنعت معدن" یک مدل بهینه‌سازی چند منظوره برای حل مسئله‌ی حمل‌ونقل پایدار گسترش یافته در صنعت استخراج ذغال سنگ، با استفاده از فرایند سلسله مراتب تحلیلی[2] و تکنیک‌های پوشش تحلیل داده[3] با هدف حداقل کردن هزینه‌ی حمل‌ونقل، میزان انتشار GHG و حداکثر کردن وزن وسایل نقلیه‌ی پایدار، ارائه داده‌اند. در نتیجه تصمیم‌گیران می‌توانند به کمک این مدل بهینه‌سازی چند منظوره، وسایل نقلیه‌ای که اقتصادی و دوست‌دار محیط زیست هستند را انتخاب کنند.

تسیتسوکاس و سعیدمنش[4] (۲۰۱۸)، در مقاله‌ای با عنوان "توزیع مطلوب خطوط اتوبوس مشخص شده در شبکه‌های شهری چند منظوره"، به معرفی خطوط اختصاصی اتوبوس جهت اجازه به وسایل نقلیه‌ی سنگین برای عبور از مناطق با ترافیک بالا بدون تأخیر طولانی پرداخته‌اند. هدف، فرموله کردن این مسأله از طریق برنامه‌ریزی خطی و تلاش برای بهینه‌سازی آن است. در این مقاله نتیجه‌ی خاصی گرفته نشده و بررسی ویژگی راه حل‌ها با بهترین مقادیر تابع هدف هستند.

بهمن‌خواه و سئیلهو[5] (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای با عنوان "بهینه‌سازی چند هدفه برای سفرهای کوتاه در یک شهر"، یک مدل چند هدفه برای مسافران در شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری برای سفرهای کوتاه را در شهر آویو در پرتغال توسعه می‌دهند. برای این منظور از یک الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده می‌کنند.

ناصرالدین و اسکندری[6] (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای با عنوان "یک روش MCDM یکپارچه برای ارزیابی سیستم حمل‌ونقل عمومی در تهران" مبتنی بر روش دلفی برای ارزیابی سیستم حمل‌ونقل عمومی، GAHP جهت ارزیابی وزن معیارها و

1. Gupta & Mehlawat
2. AHP
3. DEA
4. Tsitsokas & Saeedmanesh
5. Bahmankhah & Coelho
6. Nassereddine & Eskandari

PROMETHEE برای جمع‌آوری معیارها، به بررسی سطح رضایت مسافران حمل‌ونقل و ارزیابی سطح حمل‌ونقل عمومی پرداخته‌اند. به‌عنوان یک نتیجه از تحقیق، مهم‌ترین سیستم‌های حمل‌ونقل در تهران عبارت است از: مترو، تاکسی، بی‌آر تی، اتوبوس و ون.

هائو و یوئه[1] (۲۰۱۶)، در مقاله‌ای با عنوان "بهینه‌سازی در ترکیب مسیرها و مدهای حمل‌ونقل با برنامه‌ریزی پویا برای یک سیستم حمل‌ونقل چند منظوره‌ی کانتینری"، یک مدل بهینه‌سازی بر اساس برنامه‌ریزی پویا محدودیت‌های واقعی در این مقاله ارائه داده‌اند. سپس یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای به‌دست آوردن استراتژی ترکیبی بهینه از مدهای حمل‌ونقل پیشنهاد می‌دهند. در نهایت یک مطالعه‌ی تجربی برای نشان دادن امکان و کارآیی مدل پیشنهادی ارائه شده است.

هنری و لیتمن[2] (۲۰۱۱)، در تحقیق خود به ارزیابی کارآیی برنامه جدید ترانزیت و مقایسه اتوبوس با حمل‌ونقل ریلی در مناطق شهری آمریکا پرداخته‌اند. معیارهایی که در این ارزیابی مدنظر قرار گرفته‌اند عبارت است از: هزینه اجرا، هزینه وسیله نقلیه، تعداد مسافر به ازای هر مایل، دامنه‌ی پوشش خدمات، راحتی و آسایش، ظرفیت جابجایی، هزینه زیرساخت‌ها، انعطاف‌پذیری، سرعت و قابلیت اعتماد، تعداد ایستگاه‌ها، آلودگی صوتی و هوا، فضا به ازای هر مسافر و تعداد شبکه‌های راه. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد شهرهایی که برای جابه‌جایی مسافر، سیستم حمل‌ونقل ریلی را گسترش داده‌اند، نسبت به شهرهایی که فقط سیستم اتوبوس را افزایش داده‌اند عملکرد بهتری داشته‌اند.

اتو (۲۰۱۰)، در تحقیق خود اثر عوامل روانی را با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MADM) در انتخاب گزینه‌های حمل‌ونقل مورد بررسی قرار داده است. معیارهایی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته عبارتند از: هنجارهای اجتماعی، عوامل جمعیتی، شرایط و میزان تحرک، عوامل اقتصادی و استفاده‌کنندگان.

۳- روش پژوهش

۳-۱- ناحیه‌بندی و فرضیات مسأله

پیش از انجام مطالعات حمل‌ونقل میدانی، می‌بایست ابتدا ناحیه‌ی مورد مطالعه، تعیین و مرز آن مشخص شود. پس از تعیین محدوده‌ی برنامه‌ریزی، منطقه‌ی مورد

1. Hao & Yue
2. Henry & Litman

مطالعه به واحدهای جزئی‌تری تقسیم‌بندی می‌شود. این عمل، ناحیه‌بندی[1] نامیده می‌شود. وسعت ناحیه‌ها با توجه به مسائلی نظیر تراکم یا نوع فعالیت آن‌ها متفاوت است. در این پژوهش انتخاب ناحیه‌ها به‌صورتی انجام گرفته است که در هر ناحیه فعالیت‌های تقریباً مشابهی انجام شود. یک پارامتر مهم در تعیین حوزه‌ها، سازگاری آنها با شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری است. همواره تعیین تعداد نواحی یک مسئله‌ی مهم در ناحیه‌بندی است، چرا که تعداد زیاد نواحی سبب پیچیدگی تجزیه‌وتحلیل شده و تعداد اندک نواحی از قابلیت اتکای نتایج می‌کاهد. پس از تعیین نواحی برای هر ناحیه یک مرکز ناحیه[2] تعریف شده است. مرکز ناحیه، نماینده‌ی تمام آن ناحیه است و فرض می‌شود تمام فعالیت‌های ناحیه در مرکز آن‌ها متمرکز شده‌اند و تمام سفرهایی که از آن نقطه تولید می‌شود از آن نقطه آغاز و تمام سفرهای جذب شده نیز به آن نقطه می‌رسند؛ بنابراین مرکز ناحیه نماینده‌ی تمام ناحیه است (حقانی و شاه‌حسینی، ۱۳۹۱). مدهای حمل‌ونقل مورد استفاده در شهر اصفهان عبارتند از پیاده، دوچرخه، موتورسیکلت، سواری شخصی، اتوبوس معمولی، اتوبوس بی‌آرتی، مینی‌بوس، تاکسی، مترو، ون و تاکسی‌های اینترنتی. از بین این مدها، در پژوهش حاضر پنج مد حمل‌ونقل دوچرخه، سواری شخصی، اتوبوس معمولی، اتوبوس بی‌آرتی و مترو مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش، با هدف حداقل کردن هزینه‌ی اجتماعی به دنبال کاهش مجموع هزینه‌های زمان سفر، آلودگی هوا، هزینه‌ی زیرساخت و هزینه‌ی پرداختی از سوی مسافر جهت برآوردن تقاضای حمل و نقل موجود است.

در این بخش مدل قطعی برای تعیین ترکیب بهینه‌ای از مدهای حمل‌ونقل با هدف کاهش هزینه‌های ذکر شده ارائه خواهد شد. این مدل قطعی یک مدل بهینه‌سازی ریاضی خطی است. در مدل پیشنهادی تلاش شده است در حد امکان واقعیت‌ها و محدودیت‌های حمل‌ونقل در شهر اصفهان در نظر گرفته شود. در این پژوهش فرض شده است که میزان تقاضا ثابت و مشخص است و این تقاضا توسط یک مد حمل‌ونقل پاسخ داده می‌شود، اما در هنگام تخصیص، امکان انتخاب هر یک از پنج مد حمل‌ونقل مذکور وجود دارد و هیچ محدودیتی برای تعداد مدهای تخصیص داده شده وجود ندارد. بعد از تخصیص مد حمل‌ونقل به تقاضای موجود برای سفر از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر، امکان تعویض مد تخصیص داده شده در بین این دو ناحیه ممکن نیست. این

1. Zoning
2. Centroid

فرض چندان نیز محدودکننده نمی‌باشد، زیرا می‌توان یک سفر را به‌صورت دو سفر جداگانه در نظر گرفت. سوخت مصرفی برای خودروی شخصی، بنزین و برای انواع اتوبوس‌ها، گازوئیل (نفت گاز) در نظر گرفته شده است. با افزایش فاصله‌ی دو ناحیه، منطقی است که هزینه‌ی سفر افزایش یابد و این افزایش هزینه در مدل لحاظ شده است. زمان سفر با هریک از مدهای حمل‌ونقل به‌صورت جداگانه و در دو سطح ترافیکی سبک و سنگین در نظر گرفته شده و زمان سفر در این دو سطح ترافیکی نیز بر اساس زمان سفر آزاد به‌دست آمده است.

۳-۲- مدل بهینه‌سازی

در مدل این پژوهش، دو هدف کاهش هزینه‌ها و ایجاد حداکثر راحتی درنظر گرفته می‌شود. برای کاهش هزینه‌ها دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول هزینه را از دید مشتری حداقل می‌کند و تابع هدف دوم هزینه را از دید برنامه‌ریز اجتماعی حداقل می‌کند. سومین تابع هدف برای حداکثر کردن راحتی در نظر گرفته شده است.

اندیس‌ها

i: مبدأ	j: مقصد	k: وسایل نقلیه
t: بازه زمانی	f: نوع سوخت	P: نوع گاز آلاینده

پارامترها

$DIST_{ij}$	فاصله بین گره مبدأ i و گره مقصد j
$FUEL_{f,k}$	میزان سوخت نوع f برای وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع k در هر کیلومتر
CF_f	قیمت یک واحد سوخت نوع f
PL_k	میزان آلایندگی وسیله نقلیه k در هر واحد زمان
$CV_{(ij),k}$	هزینه استفاده از وسیله نقلیه k در مسیر ij
CO_k	میزان راحتی وسیله نقلیه k
$STR_{k(ij)}$	پارامتر باینری که برابر ۱ است، اگر زیرساخت وسیله نقلیه k در مسیر ij وجود داشته باشد در غیر این صورت صفر است.
$D_{(ij),t}$	تقاضا بین گره i , j در دوره t
$CSTR_k$	هزینه‌ی احداث وسیله نقلیه k
CAP_k	ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ی k

DET_k استهلاک وسیله‌ی نقلیه‌ی k در هر ساعت

$TT_{(ij),k}$ زمان سفر در مسیر ij با وسیله k

متغیر تصمیم:

$x_{(ij),t,k}$ حجمی از تقاضای مسیر ij که در دوره زمانی t توسط وسیله k پوشش داده می‌شود

$number_{(ij),t,k}$ تعداد وسایل نقلیه نوع k در مسیر ij در دوره زمانی t

$trav_k$ زمان سفر همه‌ی وسایل نقلیه‌ی نوع k

$maxnum_{(ij),t,k}$ حداکثر وسیله‌ی مورد نیاز از نوع k در سطح ترافیکی t

$number_{(ij),k}$ این متغیر بیان‌گر تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده از نوع *k* در مسیر ij است

$Bstr_{(ij)k}$ متغیر باینری جهت ایجاد یا عدم ایجاد زیر ساخت وسیله‌ی نقلیه‌ی k در مسیر ij

براساس پارامترها و متغیرهای تصمیم که معرفی شد، اکنون می‌توان مدل برنامه‌ریزی خطی دو هدفه را به‌صورت زیر طراحی کرد. تابع هدف اول از دو بخش هزینه‌ها از دید مردم و از دید دولت تقسیم می‌شود.

شماره	رابطه	شرح مختصر
(۱)	$\min c_{customer} = cost_{traveltime} + cost_{fuel} + cost_{transportation}$	تابع هدف اول
(۲)	$\min c_{Goverment} = cost_{polution} + cost_{infrastracture}$	تابع هدف اول
(۳)	$\max comf = \sum_k \sum_{ij} \sum_t co_k * x_{(ij)tk} * TRT_{(ij)tk}$	تابع هدف دوم
(۴)	$cost_{traveltime} = \sum_t \sum_{ij} \left[\sum_k x_{(ij)tk} * TRT_{(ij)tk} \right]$	هزینه‌ی زمان سفر
(۵)	$cost_{fuel} = \sum_f \sum_k (trav_k * FUEL_{f.k} * CF_f)$	هزینه‌ی سوخت
(۶)	$cost_{transportation} = \sum_t \sum_{ij} \sum_k CV_{(ij)tk} * x_{(ij)tk}$	هزینه‌ی حمل‌ونقل

شماره	رابطه	شرح مختصر
(۷)	$\text{cost}_{\text{polution}} = \sum_{f}\sum_{k}(\text{trav}_k * \text{PL}_k)$	هزینه‌ی آلایندگی
(۸)	$\text{cost}_{\text{infrastracture}} = \sum_{k}\text{DET}_k * \text{trav}_k + \sum_{ij}\sum_{k}\text{Bstr}_{(ij)k} * \text{CSTR}$	هزینه‌ی زیرساخت
(۹)	$\text{TRT}_{(ij)kt} = \sum_{l}\text{TT}_{(ij)kl}$	زمان سفر در زمان t
(۱۰)	$\text{trav}_k = \sum_{ij}\sum_{t}[\text{number}_{(ij)tk}] * [\text{TRT}_{(ij)tk}]$	کل زمان سفر
(۱۱)	$\text{number}_{(ij)tk} \geq \frac{x_{(ij)tk}}{\text{CAP}_k}$	تعداد وسایل هر مسیر
(۱۲)	$\text{Bstr}_{(ij)k} \leq 1 - \text{STR}_{(ij)k}$	وجود/ عدم زیرساخت
(۱۳)	$\sum_{k} x_{(ij)tk} = D_{(ij)t}$	محدودیت تقاضا
(۱۴)	$\text{maxnum}_{(ij)tk} = \frac{D_{(ij)t}}{\text{CAP}_k}$	حداکثر وسیله نقلیه
(۱۵)	$x_{(ij)tk} \leq D_{(ij)t} * [\text{Bstr}_{(ij)k} + \text{STR}_{(ij)k}]$	پوشش تقاضا

رابطه ۱، بیان‌گر تابع هدف اول به‌عنوان هزینه‌ی مشتری است که با $c_{customer}$ نشان داده می‌شود. این تابع هدف با مجموع هزینه‌های زمان سفر، هزینه سوخت و هزینه استفاده از وسیله نقلیه برابر است، که این هزینه‌ها به‌ترتیب با متغیرهای $c_{traveltime}$، c_{fuel} و $c_{transportation}$ نمایش داده شده‌اند. مقادیر این سه متغیر در روابط ۴ تا ۶ محاسبه خواهد شد.

رابطه ۲، بیان‌گر تابع هدف دوم به‌عنوان هزینه‌ی دولت است که با $c_{Goverment}$ نشان داده می‌شود و با مجموع هزینه‌های آلایندگی و زیرساخت برابر می‌باشد. دو معیار با نام‌های $c_{polution}$ و $c_{infrastractur}$ برای محاسبه‌ی هزینه از دید دولت در نظر گرفته شده است که به‌ترتیب در روابط ۷ و ۸ محاسبه خواهند شد. هزینه‌ی آلایندگی بیانگر میزان آلایندگی تولید شده توسط تمام وسایل نقلیه با هر نوع سوخت مصرفی می‌باشد.

رابطه ۳، تابع هدف سوم جهت حداکثر کردن راحتی می‌باشد. برای حداکثر کردن راحتی، لازم است مجموع راحتی وسایل نقلیه‌ی مختلف در هر زمان، حداکثر شود. تنها معیار در نظر گرفته شده در این رابطه CO_k می‌باشد. این معیار با تخصیص ضریب مشخصی از میزان راحتی به وسایل نقلیه‌ی مورد نظر در مسیرهای مشخص، میزان راحتی هر وسیله در هر واحد زمان را بیان می‌کند.

هزینه‌های زمان سفر، سوخت، حمل‌ونقل، آلایندگی و زیرساخت به‌ترتیب در محدودیت‌های ۴ تا ۸ محاسبه شده‌اند. براساس رابطه ۹، زمان سفر هر وسیله در هر مسیر محاسبه می‌شود و با ضرب شدن این مقدار در تعداد هر وسیله در هر مسیر، کل زمان سفر یک وسیله نقلیه طبق رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید.

در رابطه ۱۲، متغیر باینری Bstr تصمیم می‌گیرد که زیرساخت وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع k در مسیر ij ایجاد شود یا خیر. در صورتی‌که زیرساخت مورد نظر وجود داشته باشد، متغیر باینری STR برابر ۱ می‌شود و بنابراین $Bstr \leq 0$ خواهد بود. در این صورت Bstr کوچک‌تر یا مساوی صفر بیان می‌کند که زیرساخت وسیله‌ی نقلیه‌ی مورد نظر وجود دارد و احتیاجی به بررسی ایجاد یا عدم ایجاد آن ساختار وجود ندارد، اما اگر زیرساخت وسیله‌ی نقلیه‌ی مورد بررسی وجود نداشته باشد پارامتر STR مقدار صفر می‌گیرد و بنابراین $Bstr \leq 1$ می‌شود. در صورتی‌که Bstr کوچک‌تر یا مساوی یک شود مدل با توجه به هزینه‌هایی که به سیستم تحمیل می‌شود تصمیم می‌گیرد زیرساخت مورد نظر ایجاد شود یا خیر.

براساس رابطه ۱۳، باید تقاضای هر مسیر بین دو گره i و j در هر دوره زمانی پوشش داده شود. رابطه ۱۴ نیز بیشترین تعداد مجاز از هر وسیله نقلیه در هر مسیر را محاسبه می‌کند. طبق رابطه ۱۵، تنها در صورتی می‌توان از یک وسیله نقلیه در یک مسیر خاص استفاده کرد که یا زیرساخت آن از قبل وجود داشته باشد و یا اینکه احداث شود.

در اینجا به‌منظور تبدیل مدل به یک مدل تک‌هدفه از روش اپسیلون-محدودیت استفاده می‌شود. به این صورت که حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف دوم در نظر گرفته می‌شود و سپس این بازه به تعداد نقاط پارتو که مدنظر است تقسیم شده و با در نظر

گرفتن تابع هدف دوم به‌عنوان محدودیت، مدل برای بهینه‌سازی تابع هدف اول اجرا می‌شود.

۳-۳- استخراج داده‌ها

داده‌های خام مورد استفاده در این مقاله از مطالعات جامع شهر اصفهان به‌دست آمده که این داده‌ها به‌صورت فایل GIS از شهرداری اصفهان دریافت شده است. سپس جهت تهیه‌ی داده‌های لازم با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و EXCEL داده‌کاوی مورد نیاز انجام شده است. با استفاده از ویژگی‌های نرم‌افزار ArcGIS، کوتاه‌ترین زمان تردد بین نواحی مختلف از روی کمان‌های نقشه به‌دست آمده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار اکسل نواحی مورد نظر تقلیل یافته و میزان جذب و تولید در نواحی جدید از مجموع نواحی ادغام شده به‌دست آمده است.

۳-۳-۱- محاسبه هزینه زمان سفر

اداره راه فدرال ایالت متحده امریکا در سال ۱۹۶۴ مدلی به شکل زیر ارائه داده است که با نام تابع BPR[1] شناخته می‌شود و بیشتر توابعی که بعدها نیز ارائه شده است دارای شکل و فرم این تابع هستند:

$$t = t_0\left[1 + a(\frac{V}{Q})^b\right]$$

که در آن:

t = متوسط زمان سفر برای طی یک کیلومتر از طول راه (برحسب دقیقه)

t_0 = متوسط زمان سفر آزاد برای طی یک کیلومتر از طول راه (برحسب دقیقه)

V = حجم جریان ترافیک (برحسب وسیله نقلیه سواری برای یک متر عرض عبور در ساعت)

Q = ظرفیت عملی (برحسب وسیله نقلیه سواری برای یک متر عرض عبور در ساعت)

a و b= پارامترهای مدل است.

برای به‌دست آوردن زمان سفر بین دو ناحیه لازم است تمامی این کمان‌ها که کوتاه‌ترین زمان سفر را ارائه می‌دهد با هم جمع شوند. برای این هدف، با استفاده از

1. Bureau of Public Roads

ویژگی network analysis در نرم‌افزار ArcGIS مجموعه‌ای از مسیرها که از کمان‌های با کم‌ترین سرعت تشکیل شده است و دارای کم‌ترین زمان سفر است، ارائه می‌شود. زمان به‌دست آمده، کوتاه‌ترین زمان سفر آزاد بین دو ناحیه است که در دو حالت زمان اوج و غیر اوج محاسبه شده است. این مسیرها در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل ۱- مسیرهای دارای کوتاه‌ترین زمان سفر آزاد

۳-۳-۲- محاسبه‌ی هزینه‌ی آلودگی هوا

میزان هزینه‌ای که در هر ثانیه هر وسیله نقلیه بر اثر آلودگی هوا به اجتماع وارد می‌کند از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{cost}_{\text{polution}_k} = \sum \text{PL}_k * \text{cost}_{\text{PL}} * \text{trav}_k$$

که در آن:

$\text{cost}_{\text{polution}_k}$= هزینه آلودگی هوا برای مسیر k توسط مد مورد نظر

trav_k= زمان سفر مسیر k برای مد مورد نظر

$\sum \text{PL}_k * \text{cost}_{\text{PL}}$= جمع هزینه آلاینده‌ها به‌صورت ریال به ازای هر ثانیه

PL= میزان تولید آلاینده برای هر مد به‌صورت گرم بر ثانیه

cost_{PL}= هزینه اجتماعی آلاینده به‌صورت ریال به ازای هر گرم

جهت برآورد میزان نشر آلاینده‌های مختلف مدهای حمل‌ونقل از نتایج مطالعات جامع تهران مطابق پیوست ۲ استفاده شده است.

۳-۳-۳- هزینه استفاده از وسیله نقلیه

در این مطالعه هزینه استفاده از وسیله نقلیه، هزینه‌ای است که کاربر باید بپردازد تا بتواند با مد مورد نظر از یک ناحیه به ناحیه دیگر برود. این هزینه برای وسیله نقلیه عمومی مانند مترو، اتوبوس و بی‌آرتی همان هزینه بلیط می‌باشد. هزینه استفاده از وسیله نقلیه شخصی برای سفر بین دو ناحیه نیز همان هزینه سوخت، روغن و ... می‌باشد، که به هزینه عملیاتی وسیله نقلیه معروف می‌باشد و به فرم زیر تعریف می‌شود (حقانی و شاه‌حسینی، ۱۳۹۱):

$$C_{Veh} = \frac{C_{Fuel}^{Veh} \times U_{Fuel}^{Veh} + U_{Oil}^{Veh} \times n_{Oil}^{Veh} + U_{Tire}^{Veh} \times n_{Tire}^{Veh} + U_{Main}^{Veh} \times n_{main}^{Veh} + C_{Insure}^{Veh} + C_{Tax}^{Veh} + C_{Tech}^{Veh} + \frac{C_{own,.}^{Veh} - C_{des,n}^{Veh}}{n^{Veh}}}{K_{ann}^{Veh}}$$

هزینه زیرساخت برای محاسبه هزینه زیرساخت تسهیلات حمل‌ونقل، تقسیم‌بندی به دو دسته "هزینه‌ای" و "سرمایه‌ای" است. با توجه به آن‌که هزینه‌های سال شهرداری برای پروژه‌هایی که ممکن است در سال‌های آتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد، می‌بایست در محاسبات در نظر گرفته شود، از روش هزینه‌های یکنواخت سالیانه مطابق با رابطه زیر برای تبدیل هزینه‌های یاد شده و لحاظ کردن آنها در محاسبات استفاده شده است.

$$AC = BC * \left(\frac{i*(1+i)^{(n+a)}}{(1+i)^{(n+a)}-1}\right)$$

هزینه‌ی زیرساخت برای هر مد به‌صورت جداگانه در قالب هزینه‌ی استهلاک هر وسیله‌ی نقلیه است که با احتساب مدت زمان استفاده از هر مد محاسبه شده و قسمت دیگر سود از دست رفته‌ی هزینه‌ی احداث زیرساخت برای هر مد می‌باشد.

قسمت دوم هزینه‌ی زیرساخت: $\sum_{ij}\sum_{k} Bstr_{(ij)k} * CSTR_k * DIST_{ij}$

برای محاسبه‌ی هزینه‌ی زیرساخت در قسمت اول لازم است استهلاک هر وسیله نقلیه مشخص باشد. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی زیرساخت، قیمت هر وسیله‌ی نقلیه به مدت زمان عمر مفید هر وسیله تقسیم شده است.

در این پژوهش برای پیاده‌سازی مدل از نرم‌افزار گمز (GAMS) و جهت تهیه‌ی داده‌های مورد نیاز از داده‌های خام از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. همچنین از نرم‌افزارهای SPSS و EXCEL برای تحلیل نتایج به‌دست آمده استفاده شده است.

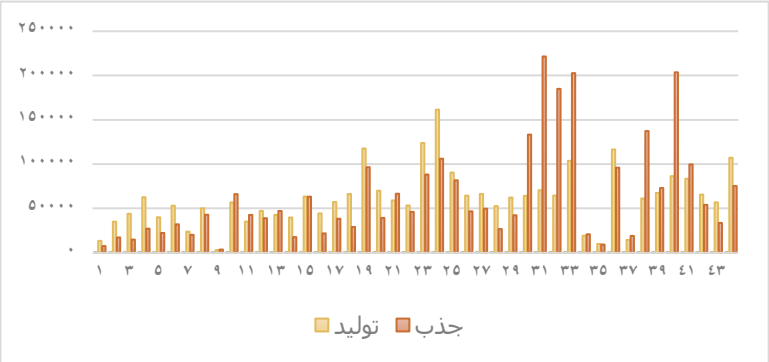
۴- تحلیل نتایج

اطلاعات مورد استفاده برای این پژوهش شامل تعداد سفرهای تولید و جذب برای ۱۸۹ ناحیه ترافیکی شهر اصفهان است که به‌منظور تجزیه و تحلیل مناسب‌تر به ۴۴ ناحیه تجمیعی همگن از نظر حمل و نقلی و با لحاظ معیارهای مختلف تقلیل یافته است. اطلاعات اولیه پژوهش شامل داده‌های مبدأ- مقصدی است که در طرح جامع حمل و نقل شهر اصفهان توسط معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری اصفهان برداشت شده و هر ساله بر اساس شاخص‌های مشخصی تعدیل می‌شود.

منبع: یافته‌های تحقیق

منبع: یافته‌های تحقیق

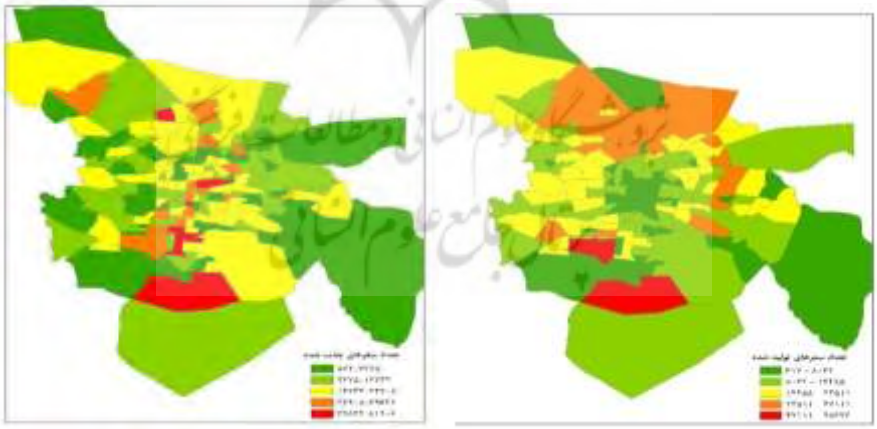
شکل ۲- ۱۸۹ ناحیه اولیه و ۴۴ ناحیه مورد استفاده در این پژوهش



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۱- تولید و جذب تقاضای سفر نواحی مورد مطالعه

به‌منظور ایجاد یک تصویر جغرافیایی از وضعیت سفرهای جذب شده و تولیدشده شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که در این نقشه مشخص است، نواحی جاذب سفر بیشتر در منطقه مرکزی شهر قرار دارند و نواحی پیرامونی میزان کمتری از سفرهای جذب شده را به خود اختصاص می‌دهند. در نقطه مقابل همین شکل نشان می‌دهد چگونه عمده سفرهای تولیدشده مرتبط با نواحی پیرامونی هستند و این بار سهم نواحی مرکزی از تولید سفر شهری کمتر از نواحی پیرامونی است. این داده‌ها با مشاهدات معمول روزانه نیز منطبق است، به‌گونه‌ای که به‌طور عمده جمعیت مسافرین جهت امور خرید و کار به سمت نواحی مرکزی در جریان است.

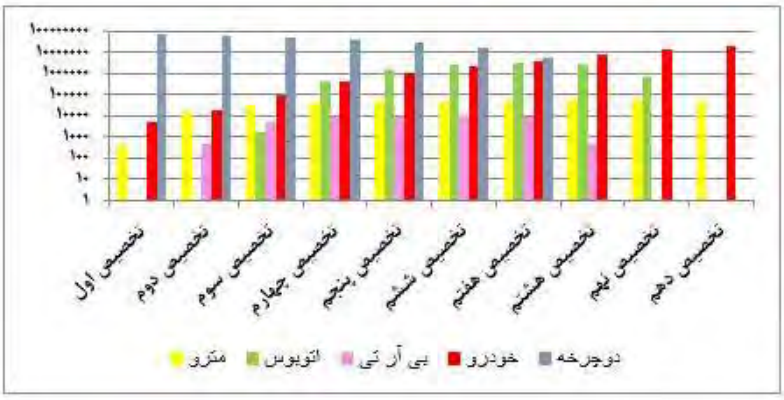


منبع: یافته‌های پژوهش

شکل ۳- پراکنش جغرافیایی تعداد سفرهای جذب و تولید شده نواحی مورد مطالعه

از آنجا که مدل به‌صورت چند معیاره طراحی شده است و میزان راحتی به‌عنوان یک شاخص کمی شده در مدل لحاظ می‌شود، برای تعیین ترکیب بهینه مدهای حمل‌ونقل با احتساب میزان مناسبی از راحتی، مدل ده مرتبه اجرا شده است، بدین‌صورت که در گام اول بدون در نظر گرفتن معیار راحتی با هدف دستیابی به حداقل هزینه‌ها مدل اجرا شده است. همان‌طورکه انتظار می‌رفت در راستای هدف گام اول مدل، یعنی کاهش هزینه‌ها، تمامی تقاضای سفر به سه مد دوچرخه، مترو و خودرو شخصی تخصیص داده می‌شود. در ادامه برای اجرای هر گام ضریب راحتی به میزان ۱۰ درصد افزایش داده شده، به‌گونه‌ای که گام دهم مدل با هدف حداکثر راحتی اجرا شده است. همان‌طورکه انتظار می‌رفت در این مرحله تمامی تقاضا به دو مد مترو و خودرو که بیش‌ترین راحتی را برای مسافر دارد تخصیص یافته است.

نمودار ۲، نشان‌دهنده‌ی میزان استفاده از هر وسیله‌ی نقلیه در دوره اوج است، که در مراحل اول تا دهم به هر وسیله‌ی نقلیه تخصیص یافته است. به‌طور روشن مشاهده می‌شود که در مراحل اول برای کاهش هزینه، میزان استفاده از دوچرخه بیش‌تر از سایر مدها بوده است و در مراحل آخر به‌دلیل در نظر گرفتن کردن راحتی، میزان استفاده از دوچرخه به صفر رسیده است. در نقطه مقابل با افزایش سطح راحتی مورد نظر، میزان استفاده از خودروی شخصی افزایش یافته است، تا جایی که در بالاترین سطح راحتی تنها دو مد خودرو شخصی و مترو مورد استفاده تقاضاکنندگان قرار می‌گیرد. روند تغییرات تخصیص مد مترو نیز بسیار قابل توجه است. مترو به دلیل هزینه‌های قابل رقابت با خودرو شخصی از همان ابتدا در سبد تخصیص بهینه قرار داشته و با افزایش راحتی از سهم دوچرخه کاسته شده و به سهم مترو افزوده می‌شود اگرچه این افزایش از گام چهارم متوقف شده و بیشتر افزایش راحتی از این گام به بعد توسط خودرو شخصی تأمین می‌شود. میزان استفاده از اتوبوس و بی آر تی نیز با افزایش سطح راحتی تغییرات قابل توجهی را تجربه می‌کند. این دو مد وسیله حمل و نقل عمومی بیشتر در دامنه‌های میانی سهم بالایی دارند و در دامنه‌های حدی بالا و پایین راحتی سهم کمتری به خود اختصاص می‌دهند. لازم به ذکر است با توجه به هدف قرارگرفتن حالت ششم به‌عنوان حالت بهینه، سهم قابل توجهی به استفاده از اتوبوس و بی آرتی اختصاص یافته است.



منبع: یافته‌های تحقیق

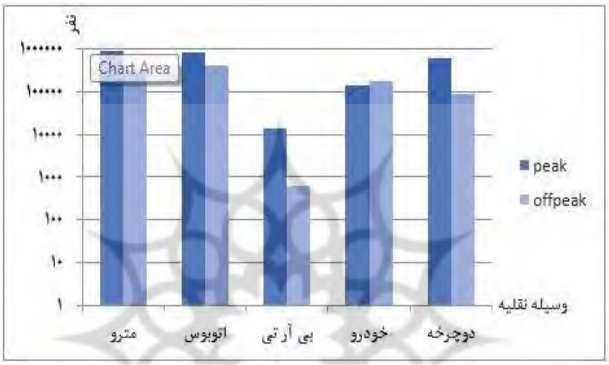
نمودار ۲- میزان استفاده از مدهای مختلف حمل‌ونقل در سطوح راحتی مختلف

به‌منظور مقایسه دقیق‌تر سطوح مختلف راحتی و میزان هزینه اجتماعی برای هر گام از ارتقای شاخص راحتی، افزایش هزینه محاسبه شده، که نتایج آن در نمودار ۳ آورده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود تا گام ششم هزینه‌های مذکور با شیب ملایمی افزایش یافته، اما بعد از گام ششم شیب نمودار نسبت به قبل افزایش چشم‌گیری داشته است. این تحلیل می‌تواند مبنای مناسبی برای تصمیم‌گیری کلان برای انتخاب سطح مطلوبی از راحتی قرار گیرد.

منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار۳- نسبت تغییرات راحتی به هزینه

بنابراین در صورت محدودیت بودجه، گام ششم که نتایج آن در نمودار ۴ نمایش داده شده است، می‌تواند مرحله‌ی مناسبی برای سیاست‌گذاری در نظر گرفته شود. در این حالت در زمان اوج سفر مدهای مترو، اتوبوس و دوچرخه بیشترین تقاضا را خواهند داشت و مدهای خودرو شخصی و اتوبوس بی آر تی در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. این در حالی است که در زمان غیراوج، استفاده از خودرو شخصی نسبت به استفاده از دوچرخه پیشی می‌گیرد. موضوع مهم تخصیص قابل توجه مد دوچرخه به تقاضاهای موجود می‌باشد که با داده‌های موجود بسیار متفاوت است.



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۴- تخصیص بهینه در سطح متعادل از راحتی و هزینه اجتماعی

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از برنامه‌ریزی خطی حاکی از آن است که در حالت‌های مختلف ترکیب هزینه و راحتی، مدل تخصیص‌های متفاوتی را ارائه می‌دهد. پذیرفتن راحتی فراوان برای استفاده‌کنندگان انواع مدهای حمل و نقل تخصیص بهینه را به سمت استفاده از خودرو شخصی سوق می‌دهد، درحالی‌که حداقل سازی هزینه‌های اجتماعی مستلزم استفاده از وسایل حمل و نقل پاک و کم هزینه مانند پیاده روی و دوچرخه سواری می‌باشد که عملاً ممکن است با روحیات و سبک زندگی فعلی شهروندان منطبق نباشد، اما فرهنگ‌سازی در جهت پذیرفتن سطح پایین‌تری از راحتی توسط شهروندان، مدیران شهری را با هزینه‌های اجتماعی کمتری در تأمین نیازهای حمل و نقل مواجه خواهد که به‌طور حتم رفاه بیشتر را برای شهروندان در بلندمدت به ارمغان خواهد آورد.

انتخاب سطح مناسبی از راحتی برای تأمین نیازهای حمل و نقل شهروندان و برنامه‌ریزی برای توسعه زیرساخت‌های مورد نیاز از نتایج مهم و کلیدی این پژوهش به شمار می‌رود، که در این سطح مناسب و تعادلی بین راحتی و هزینه‌های اجتماعی می‌توان ترکیب بهینه مدهای حمل و نقل شهری را برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری به‌دست آورد.

پیوست

میزان انتشار آلاینده برای هر وسیله نقلیه تابع سرعت وسیله نقلیه می‌باشد. در این مطالعه برای محاسبه میزان انتشار آلاینده سواری و اتوبوس در ساعت اوج، میانگین میزان انتشار هر آلاینده در سرعت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتر بر ساعت مدنظر قرار گرفته است. در ساعت غیر اوج نیز میانگین میزان انتشار برای سرعت‌های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده؛ بنابراین برای دو مد اتوبوس و سواری میزان انتشار آلاینده‌ها برای ساعت اوج و غیر اوج بر حسب گرم بر ثانیه محاسبه شده است.

میزان هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بر اساس مطالعه بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست به قیمت سال ۱۳۹۱ بر اساس (هزار ریال بر تن)

مقدار انتشار آلاینده بر حسب g/s	آلاینده				
	CO	NOx	PM۱۰	SO	HC
در حالت سکون (حرکت درجا)	۰.۰۵	۰.۰۰۵			۰.۰۰۶۷
در حال حرکت					
(کیلومتر بر ساعت)۱۰	۰.۲۰۴۰۱۳۳	۰.۰۴۵۱۹۲	۰.۰۲۰۴۸۳۳	۰.۰۰۳۶۳۰۳	۰.۰۲۵۹۹۹۹
(کیلومتر بر ساعت)۲۰	۰.۱۱۰۸۳۸۹	۰.۰۴۷۶۸۳۳	۰.۰۱۳۸۳۳۳	۰.۰۰۱۵۱۱۱	۰.۰۴۲۶۷۷۸
(کیلومتر بر ساعت)۳۰	۰.۰۸۶۳۶	۰.۰۸۹۹۲۴۹	۰.۰۲۳۷۵	۰.۰۰۲۹۱۴۵	۰.۰۶۵۹۸۷۱
(کیلومتر بر ساعت)۴۰	۰.۱۱۱۵	۰.۰۵۰۷۳۳۳	۰.۰۲۵۹۳۳۳	۰.۰۰۲۶۱۱۱	۰.۰۶۱۲۷۷۸
(کیلومتر بر ساعت)۵۰	۰.۱۶۸۳۳۳۳	۰.۰۸۹۴۱۱۸	۰.۰۳۲۷۹۴۴	۰.۰۰۳۳۷۳۶	۰.۰۹۱۴۱۳۲
(کیلومتر بر ساعت)۶۰	۰.۲۳۷۴	۰.۰۳۴۱۵	۰.۰۳۹۸۳۳۳	۰.۰۰۴۰۳۳۳	۰.۰۸۲۰۸۳۳
(کیلومتر بر ساعت)۷۰	۰.۳۰۱۲۴	۰.۰۶۲۳۹۹۴	۰.۰۴۵۷۵	۰.۰۰۴۶۰۲۱	۰.۱۰۴۰۲۴۹

میزان انتشار آلاینده‌ها برای وسیله نقلیه سواری

نوع گاز	NOx	SO2	CO	SPM	CO2	CH4
مقدار هزینه	۴۸۰۰	۱۴۶۰۰	۱۵۰۰	۳۴۴۰۰	۸۰	۱۶۸۰

منبع: مطالعات جامع تهران

میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای اتوبوس

مقدار انتشار آلاینده بر حسب g/s	آلاینده				
	CO	NOx	PM۱۰	SO	HC
در حالت سکون (حرکت درجا)	۰.۰۶	۰.۰۰۰۸			۰.۰۰۶۷
در حال حرکت					
(کیلومتر بر ساعت) ۱۰	۰.۰۰۶۰۶۰۳	۰.۱۶۱۷۶۱۵	۰.۰۰۱۰۵۲۵	۴.۳۸E-۰۵	۰.۰۱۹۹۷۶۲
(کیلومتر بر ساعت) ۲۰	۰.۰۰۶۶۳۸۹	۰.۲۱۱۵۴۴۴	۰.۰۰۱۳۸۸۹	۶.۱۱E-۰۵	۰.۰۲۱۸۸۳۳
(کیلومتر بر ساعت) ۳۰	۰.۰۱۷۰۶۲۳	۰.۲۴۱۵۴۳۲	۰.۰۰۱۷۵۹	۷.۵۷E-۰۵	۰.۰۲۳۴۸۸۲
(کیلومتر بر ساعت) ۴۰	۰.۰۱۸۰۵۵۶	۰.۲۵۷۹۶۶۷	۰.۰۰۲۱۴۴۴	۸.۸۹E-۰۵	۰.۰۲۴۸۵۵۶
(کیلومتر بر ساعت) ۵۰	۰.۰۳۲۳۶۴۷	۰.۲۶۶۷۳۲۶	۰.۰۰۲۵۶	۰.۰۰۰۱۰۲۱	۰.۰۲۶۰۸۳۶
(کیلومتر بر ساعت) ۶۰	۰.۰۳۳۷۵	۰.۲۷۴۱۱۶۷	۰.۰۰۲۹۵	۰.۰۰۰۱۱۶۷	۰.۰۲۷۲
(کیلومتر بر ساعت) ۷۰	۰.۰۳۷۴۲	۰.۲۸۵۹۸۳۲	۰.۰۰۳۳۸۸۷	۰.۰۰۰۱۳۴	۰.۰۲۸۳۶۲۳

منبع: مطالعات جامع تهران

منابع

۱. احمدوند، علی محمد، محمدیانی، زینب و خدادادی ابیازنی، حدیثه (۱۳۹۴). مدل‌سازی پویای دستگاه حمل ونقل شهری پایدار به‌منظور اصلاح و بهبود ترافیک. مدرس علوم انسانی، پژوهش‌های مدیریت در ایران (۲) ۳۱-۲.

۲. برادران، وحید و آذری‌خواه، ارمغان (۱۳۹۹). ارائه مدل چندهدفه مسیریابی در شبکه سیستم‌های حمل و نقل عمومی چندوجهی درون شهری. مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۸(۵۷): ۳۷۵-۳۴۵.

۳. حقانی میلاد و شاه‌حسینی، زهرا (۱۳۹۱). کتاب برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و مهندسی ترافیک، تهران: نشر کتاب آوا.

۴. محمدی ده چشمه، پژمان و مهدوی، داود (۱۳۹۸). برنامه‌ریزی استراتژیک بهبود جایگاه سیستم حمل و نقل شهری در شهرکرد با استفاده از تلفیق رویکردهای SWOT و QSP. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۳(۶۸): ۲۶۴-۲۴۵.

۵. شیرزادی بابکان، علی، طالعی، محمد و علیمحمدی، عباس (۱۳۹۲). انتخاب وسیله حمل و نقل عمومی مناسب در یک کریدور شهری: کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای (۱۸)۲۴-۱.

۶. صلواتی، علیرضا و حق‌شناس، حسین (۱۳۸۷). یکپارچه‌سازی سیستم حمل و نقل عمومی به روش AHP مطالعه موردی: شهر اصفهان هشتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
۷. مطالعات جامع تهران (۱۳۹۲). طرح کاهش میزان آلایندگی هوا و صوت ناشی از ترافیک در شهر تهران، مطالعات مقدماتی، کارفرما: سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران
۸. مطالعات جامع مشهد (۱۳۸۹). معاونت حمل‌ونقل و ترافیک، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک، ساخت، پرداخت مدل‌های تابع زمان سفر- حجم برای معابر اصلی، مهندسین مشاور طرح هفتم.
9. Abu-Allaban, M., & Abu-Qudais, H. (2011). Impact assessment of ambient air quality by cement industry: A case study in Jordan. Aerosol and Air Quality Resarch, 11(7), 802-810 .
10. Awasthi, A. Chauhan, S. S., Omrani, H., & Panahi, A. (2011). A hybrid approach based on SERVQUAL and fuzzy TOPSIS for evaluating transportation service quality. Computers & Industrial Engineering, 61(3), 637-646 .
11. Bahmankhah, B., & Coelho, M. C. (2017). Multi-objective optimization for short distance trips in an urban area: choosing between motor vehicle or cycling mobility for a safe, smooth and less polluted route. Transportation Research Procedia, 27, 428-435 .
12. Elbert, R., Müller, J. P., & Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal transportation–A systematic literature review. Research in Transportation Business & Management, 35, 100462.
13. El-Diraby, T., Abdulhai, B., & Pramod, K. (2005). The application of knowledge management to support the sustainable analysis of urban transportation infrastructure. Canadian Journal of Civil Engineering, 32(1), 58-71 .
14. Fellesson, M., & Friman, M. (2012). Perceived satisfaction with public transport service in nine European cities. Paper presented at the Journal of the Transportation Research Forum.
15. Gupta, P., Mehlawat, M. K., Aggarwal, U., & Charles, V. (2018). An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. Resources Policy.

16. Hao, C., & Yue, Y. (2016). Optimization on combination of transport routes and modes on dynamic programming for a container multimodal transport system. Procedia engineering, 137, 382-390 .
17. Henry, L., & Litman, T. A. (2011). Evaluating New Start Transit Program Performance.
18. Jeon, C. M., Amekudzi, A. A., & Guensler, R. L. (2013). Sustainability assessment at the transportation planning level: Performance measures and indexes. Transport Policy, 25, 10-21 .
19. Jonsson, R. D. (2008). Analysing sustainability in a land-use and transport system. Journal of Transport Geography, 16(1), 28-41 .
20. Lai, W.T., & Chen, C.F. (2011). Behavioral intentions of public transit passengers—The roles of service quality, perceived value, satisfaction and involvement. Transport Policy, 18(2), 318-325 .
21. Nassereddine, M., & Eskandari, H. (2017). An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. Transportation Research Part A :Policy and Practice, 106, 427-439 .
22. Otto, S. (2010). The psychology of transport choice. Institute for Ecological Economic Research (IÖW), Corpus-The SCP Knowledge Hub .
23. Ülengin, F., Kabak, Ö., Önsel, Ş., Ülengin, B., & Aktaş, E. (2010). A problem-structuring model for analyzing transportation–environment relationships. European Journal of Operational Research, 200(3), 844-859 .
24. Verma, A., & Ramanayya, T. (2014). Public transport planning and management in developing countries: CRC Press.
25. Yu, X., Miao, H., Bayram, A. Yu, M. & Chen, X. (2021). Optimal routing of multimodal mobility systems with ride sharing. International Transactions in Operational Research, 28(3), 1164-1189.

پرتال جامع علوم انسانی