Journal of Structural and Construction Engineering, 10(4), 2023, pp. 5-22

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Bus Rapid Transit Network Design based on Travel Demand: A Case Study of Karaj, Iran

Mahmoud Reza Keymanesh [1]*, AmirMohammad Parvini[2]

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
2- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The bus rapid transit (BRT) network is an important public transportation system in some metropolises across the world. Hence, many urban managers and planners seek to develop BRT networks as they are more much flexible than railway transportation networks and can transport huge numbers of passengers. This paper designed a BRT network based on the travel demand using a binary nonlinear mathematical programming model with the aim of maximizing the covered demand and minimizing the construction cost. To calculate the covered travel demand and solve the model, a novel methodology which is exclusive to this study was proposed. To obtain the covered travel demand, the number of covered travels was calculated using the concentric circle method and the center of mass distances of the covered trips in the origins and destinations from the travel start and end stations. Based on the trip demand lines, major production and attraction land-uses, and network shape and integration, five BRT corridors were considered for the city of Karaj, Iran. The network design results suggest that the corridors would cover a total of 244,600 trips (28.7% of the total morning peak-hour trips in 2031). The corridors were estimated to have a total construction cost of 282.5 million USD.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 June 2022
Revise Date: 15 August 2022
Accept Date: 10 September 2022

Keywords:
BRT,
Network design,
Mathematical programming model,
Travel demand cover,
Corridor design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348096.2854

*Corresponding author: Mahmoud Reza Keymanesh.
Email address: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

طراحی شبکه اتوبوس تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر (مطالعه موردی شهر کرج)

محمود رضا کی منش [۱*]، امیرمحمد پروینی [۲]

۱- استادیار، گروه عمران-راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲-دانشجوی دکتری، گروه عمران-راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

شبکه اتوبوسرانی تندرو یکی از مهم‌ترین شیوه‌های حمل و نقل همگانی در برخی از کلان‌شهرهای دنیا است. از این‌رو بسیاری از مدیران و برنامه‌ریزان شهری به دنبال توسعه آن هستند؛ زیرا این شیوه به نسبت شیوه‌های ریلی بسیار منعطف‌تر بوده و می‌تواند تعداد مسافران قابل توجهی را جا به جا نماید.بدین جهت، در پژوهش جاری به طراحی شبکه اتوبوسرانی تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر پرداخته می‌شود. در مطالعه حاضر از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیر خطی استفاده می‌گردد که هدف آن بیشینه کردن تقاضای پوشش داده شده و کمینه کردن هزینه ساخت است. به منظور محاسبه تقاضایِ سفرِ پوشش داده شده و همچنین حل مدل ارائه شده، یک روش جدید که خاص این مطالعه است، پیشنهاد می‌گردد. برای محاسبه تقاضای سفر پوشش داده شده با استفاده از روش دوایر هم‌مرکز و فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده در نواحی مبدا و مقصد از ایستگاه شروع و پایان سفر، تعداد سفرهای پوشش داده شده محاسبه می‌گردد. بر اساس نتایج خطوط تمایل سفر، کاربری‌های عمده تولید و جذب سفر و همچنین شکل و یکپارچگی شبکه، برای شهر کرج، ۵ کریدور مختلف اتوبوس تندرو در نظر گرفته می‌شود که نتایج طراحی شبکه حاکی از آن است این کریدورها جمعا ۲۴۴/۶ هزار سفر را معادل ۲۸/۷ درصد کل سفرهای یک ساعت اوج صبح شهر کرج در سال ۱۴۱۰ را پوشش می‌دهند. هزینه ساخت این کریدورها در کل برابر با ۲۸۲/۵ میلیون دلار برآورد می‌گردد.

کلمات کلیدی: اتوبوس تندرو، طراحی شبکه، مدل برنامه‌ریزی ریاضی، پوشش تقاضای سفر، طراحی کریدور.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۱/۰۴/۰۶	۱۴۰۱/۰۵/۲۴	۱۴۰۱/۰۶/۱۹	۱۴۰۱/۰۶/۱۹	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2022.348096.2854
					https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348096.2854

*نویسنده مسئول: محمود رضا کی منش
پست الکترونیکی: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین زیرساخت‌ها در کلان‌شهرهای دنیا شبکه حمل و نقل همگانی آن‌ها است که حجم قابل توجهی از سفرهای درون‌شهری توسط این شبکه‌ها سرویس‌دهی می‌شوند. به طور معمول سیستم حمل و نقل همگانی در شهرهای بزرگ از شیوه‌های مختلفی همچون اتوبوس، مترو، اتوبوس تندرو و قطارهای سبک شهری تشکیل می‌گردند. برای طراحی هر یک از شیوه‌های حمل و نقل همگانی، الزامات منحصر به فردی باید در نظر گرفته شود، اما به طور کلی در فرآیند طراحی آن‌ها به شاخص‌هایی همچون هزینه ساخت، تقاضای جذب شده، پوشش بخش‌های مختلف شهر، و نحوه ایجاد دسترسی بین بخش‌های مهم شهر توجه می‌شود.

یکی از مهم‌ترین شیوه‌های حمل و نقل همگانی در شهرهای بزرگ دنیا، شیوه حمل و نقل اتوبوسرانی تندرو است که در این پژوهش مدلی به منظور طراحی شبکه اتوبوسرانی تندرو با لحاظ کردن تقاضای پوشش داده شده ارائه می‌گردد. در واقع می‌توان گفت سامانه اتوبوسرانی تندرو، غالب منافع و مزایای سیستم اتوبوسرانی سنتی و قطارهای سبک شهری را به صورت همزمان دارد. به بیان ساده‌تر می‌توان گفت سامانه اتوبوسرانی تندرو در مقایسه با سیستم قطار سبک شهری هزینه کمتر و در عین حال انعطاف انعطاف‌پذیری سیستم اتوبوسرانی سنتی را دارد، در حالی که کارایی و امکانات رفاهی آن می‌تواند شبیه به قطارهای سبک شهری باشد. به دلیل آنکه خطوط اتوبوسرانی تندرو در غالب مسیر از ترافیک معابر جدا شده‌اند، تواتر آن‌ها به نسبت خطوط اتوبوسرانی عادی بیشتر است و می‌توانند تعداد مسافران بیشتری را به خود جذب نمایند.

در مطالعه حاضر از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل ترافیک شهر کرج به منظور طراحی کریدورهای مناسب جهت احداث سامانه اتوبوسرانی تندرو استفاده می‌گردد. همچنین در پژوهش جاری یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیرخطی و یک روش حل ابتکاری برای آن ارائه خواهد شد. همچنین به منظور تدقیق محاسبه تقاضای پوشش داده شده، در این مطالعه روشی جدید پیشنهاد می‌گردد.

در بخش دوم مقاله به بررسی مطالعات پیشین پرداخته می‌شود و در بخش سوم تا پنجم به ترتیب روش‌شناسی پژوهش، تحلیل و بررسی نتایج و جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- مرور ادبیات تخصصی

شبکه حمل و نقل همگانی به عنوان یکی از زیرساخت‌های پایه‌ای و اساسی شبکه حمل و نقل شهرها شناخته می‌شود. از این‌رو بسیاری از تحقیقات و مطالعات پیشین در این حوزه انجام شده است. یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که مورد توجه بسیاری از محققان بوده، مساله طراحی مسیر شبکه حمل و نقل همگانی است که در ادبیات تخصصی به اختصار TRNDP گفته می‌شود [۱-۴]. یکی از پایه‌ای‌ترین پژوهش‌ها در زمینه طراحی شبکه اتوبوسرانی توسط سدر و ویلسون در سال ۱۹۸۶ انجام گردید. آن‌ها در این مطالعه برای فرآیند برنامه‌ریزی سامانه اتوبوسرانی پنج مرحله به شرح ۱) طراحی شبکه مسیرها، ۲) تعیین تناوب حرکت وسایل، ۳) تعیین جدول زمان‌بندی حرکت، ۴) زمان‌بندی ناوگان و ۵) زمان بندی خدمه و کارکنان را در نظر گرفتند [۵].

در بسیاری از مطالعات پیشین به منظور طراحی شبکه اتوبوسرانی از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است. به طور کلی می‌توان گفت نوآوری‌های این پژوهش‌ها در سه جنبه مختلف ۱) نوآوری در تابع هدف، ۲) قیدهای مساله و ۳) روش حل مدل قرار می‌گیرند. به منظور تحلیل و بررسی مطالعات پیشین در جدول ۱ خلاصه این مطالعات آورده شده است.

جدول ۱: بررسی مقالات پیشین

پژوهشگر (سال)	موضوع	تابع هدف	قیدهای مهم	روش حل
Ceder & Wilson (۱۹۸۶) [۵]	طراحی شبکه اتوبوسرانی	حداقل کردن تعداد تبادل سفر	لحاظ کردن زمان سفر و طول حداقل و حداکثر مسیر	روش ابتکاری ارائه شده
Ceder & Israeli (۱۹۹۳) [۶]	طراحی و ارزیابی شبکه همگانی	حداقل نمودن زمان سفر، زمان انتظار، ظرفیت خالی ناوگان و تعداد ناوگان	-	روش ابتکاری ارائه شده
Israeli & Ceder (۱۹۹۵) [۷]	طراحی شبکه همگانی	حداقل نمودن زمان سفر، زمان انتظار، ظرفیت خالی ناوگان و تعداد ناوگان	-	روش ابتکاری ارائه شده
Dufourd و همکاران (۱۹۹۶) [۸]	مکان‌یابی خط	بیشینه کردن پوشش جمعیتی شبکه	حداقل و حداکثر طول کمان	جست و جوی ممنوع
Pattnaik و همکاران (۱۹۹۸) [۹]	طراحی شبکه اتوبوس شهری	حداقل نمودن هزینه کاربر و اپراتور	حداقل تناوب و حداکثر ضریب اشغال وسیله	الگوریتم ژنتیک
Bielli و همکاران (۲۰۰۲) [۱۰]	بهینه سازی شبکه اتوبوس شهری	محاسبه تابع فیتنس برای الگوریتم ژنتیک در مساله بهینه سازی شبکه اتوبوسرانی	-	الگوریتم ژنتیک
Bruno و همکاران (۲۰۰۲) [۱۱]	طراحی شبکه و ارائه راهکار ابتکاری حل مدل	بیشینه کردن پوشش جمعیتی شبکه	حداقل و حداکثر طول کمان	روش ابتکاری ارائه شده
Zhao و همکاران (۲۰۰۵) [۱۲]	بهینه سازی شبکه حمل و نقل همگانی	کمینه کردن تبادل و بیشینه کردن پوشش	حداقل و حداکثر طول کمان	ترکیب روش ابتکاری و فراابتکاری شبیه سازی تبرید و جست و جوی ممنوع
Yang و همکاران (۲۰۰۷) [۱۳]	بهینه سازی شبکه اتوبوسرانی	بیشینه کردن تراکم مسافران با مسیر مستقیم	-	کلونی مورچگان
Zhao & Zeng (۲۰۰۸) [۱۴]	بهینه‌سازی مسیر، سرفاصله و جدول زمان‌بندی	کمینه کردن هزینه مسافر	حداقل و حداکثر طول مسیر - حداقل و حداکثر سرفاصله و حداقل مستقیم بودن	شبیه‌سازی تبرید
Wu & Szeto (۲۰۱۱) [۱۵]	طراحی همزمان مسیر اتوبوس و تناوب	بهبود سرویس دهی با کاهش تعداد تبادل و زمان	تعداد ناوگان - بازه تناوب - حداکثر زمان سفر و بیشینه	کلونی مورچگان

پژوهشگر (سال)	موضوع	تابع هدف	قیدهای مهم	روش حل
	حرکت	سفر	تعداد ایستگاه	
Gutierrez-Jarpa و همکاران (۲۰۱۳) [۱۶]	طراحی کریدورهای انبوه‌بر شهری	بیشینه کردن تقاضای پوشش داده شده و کمینه کردن هزینه ساخت (ترکیب خطی)	حداقل و حداکثر طول کمان، لحاظ کردن شرایط تبادل سفر	روش شاخه و بریدن
Ouyang و همکاران (۲۰۱۴) [۱۷]	طراحی شبکه اتوبوسرانی تحت تاثیر ناهمگونی تقاضا	کمینه کردن نارضایتی مسافران - تعداد تبادل و زمان سفر	حداقل تقاضای پاسخ داده شده	تحلیلی
Nikolic & Teodorovic (۲۰۱۴) [۱۸]	طراحی شبکه حمل و نقل همگانی همزمان با تعیین تعداد ناوگان	کمینه کردن نارضایتی مسافران - کل زمان سفر و تعداد ناوگان	ظرفیت ناوگان، ظرفیت کمان‌ها و تقاضای پاسخ داده شده	کلونی زنبور مصنوعی
Walteros و همکاران (۲۰۱۵) [۱۹]	یک الگوریتم هایبرید برای طراحی مسیر اتوبوس تندرو	کمینه کردن هزینه‌های مسافران و اپراتور	تعداد ناوگان - ظرفیت ناوگان و ظرفیت مسیر	الگوریتم ژنتیک هایبرید
Cipriani و همکاران (۲۰۱۹) [۲۰]	طراحی شبکه حمل و نقل همگان برای شهرهای کوچک	کمینه کردن هزینه‌های مسافران و اپراتور	-	الگوریتم ارائه شده در مقاله
Ahmed و همکاران (۲۰۱۹) [۲۱]	حل مساله طراحی شبکه با یک روش انتخاب ابتکاری	کمینه کردن هزینه‌های مسافران و اپراتور	-	الگوریتم ارائه شده در مقاله
Wang و همکاران (۲۰۲۰) [۲۲]	طراحی شبکه اتوبوسرانی شهری	کمینه کردن زمان سفر و بیشینه کردن تقاضای پاسخ داده شده	ویژگی‌های مسیر	الگوریتم ارائه شده در مقاله
Momenitabar Mattson & (۲۰۲۱) [۲۳]	بهبود شرایط شبکه حمل و نقل همگانی	کمینه کردن هزینه‌های مسافران و اپراتور و بیشینه کردن پوشش	طول مسیر، ویژگی‌های مسیر و تقاضای پاسخ داده شده	NSGA-II
Mahdavi و همکاران (۲۰۲۱) [۲۴]	طراحی شبکه همگانی	کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن پوشش	ضریب فازی برای حداقل و حداکثر طول کمان	الگوریتم ابتکاری مقاله
Duran-Micco و همکاران (۲۰۲۲) [۲۵]	طراحی برنامه خط اتوبوسرانی	کمینه کردن تعداد ناوگان و زمان سفر مسافران	-	الگوریتم ارائه شده در مقاله
نوآوری‌های پژوهش حاضر	طراحی شبکه اتوبوسرانی تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر	بیشینه کردن نسبت تقاضای پوشش داده شده به هزینه ساخت (ترکیب غیر خطی)	حداقل و حداکثر طول کمان، لحاظ کردن شرایط تبادل سفر	روش حل دو سطحی پیشنهادی

براساس مطالعات بررسی شده مشخص می‌گردد در اکثر پژوهش‌های پیشین به منظور پوشش تقاضا فرض می‌گردد که تمامی ویژگی‌های نواحی ترافیکی در مرکز نواحی ترافیکی قرارگرفته و چنانچه این نقطه در شعاع پوشش داده شده قرار گیرد، تقاضای آن پوشش داده می‌شود اما اگر قرار نگیرد پوشش داده نمی‌شود. در این پژوهش روشی نوین جهت تعیین تقاضای سرویس داده شده ارائه می‌گردد که نقطه ضعف روش مرسوم را بر طرف می‌نماید. در مطالعات پیشین برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی روش‌های ابتکاری و فراابتکاری مختلفی مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند همانند روش الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات [۲۶]، ترکیب الگوریتم شاهین هریس و ژنتیک [۲۷] اما شایان ذکر است که در این مطالعه یک روش حل جدیدی برای حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی طراحی شبکه اتوبوسرانی ارائه می‌گردد. در قالب روش‌های مورد استفاده توسط پژوهشگران پیشین شبکه در یک مرحله طراحی می‌گردد. اما در این روش پیشنهادی ابتدا مدل با استفاده از روش برونو و همکاران [۱۱] طراحی می‌گردد سپس نواحی کاندید ایستگاه با نواحی همسایه خود جا به جا می‌شوند و تغییر تابع هدف محاسبه می‌گردد چنانچه این تغییر مثبت و باعث بهبود تابع هدف گردد، ناحیه همسایه با ناحیه اولیه جا به جا و شکل شبکه به روزرسانی می‌گردد.

۳- روش‌شناسی

سامانه اتوبوسرانی تندرو در بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا به عنوان یکی از شیوه‌های مهم و اساسی حمل و نقل همگانی محسوب می‌شوند که در این پژوهش سعی بر آن است تا مدل و روشی جهت طراحی این شبکه پیشنهاد گردد. به منظور طراحی شبکه‌های حمل و نقل همگانی در ادبیات تخصصی، شبکه را به صورت یک گراف معادل در نظر می‌گیرند که در آن گره‌ها بیانگر ایستگاه‌های شبکه و کمان‌های گراف مسیر شماتیک حمل و نقل همگانی محسوب می‌گردند. در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از داده‌های طرح جامع حمل و نقل شهر کرج ایران، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیر خطی، شبکه اتوبوسرانی تندرو برای این شهر طراحی گردد. که در روابط ۱ تا ۱۲ این مدل بیان شده است. در این مدل متغیر تصمیم دو تایی x_{ij}^{s} برابر با یک خواهد بود اگر و فقط اگر کمان (j،i) در قطعه s قرار داشته باشد، متغیر تصمیم دوتایی y_i برابر با یک خواهد بود اگر و تنها اگر گره i (مرکز ناحیه ترافیکی i) جز گره‌های تبادلی باشد و همچنین متغیر تصمیم w_i برابر با یک خواهد بود اگر و تنها اگر گره i (مرکز ناحیه ترافیکی i) جزئی از قطعه s باشد. علاوه‌بر متغیرهای تصمیم گفته شده، متغیر تصمیم دیگری با نام v_{ij} در مدل وجود دارد که این متغیر در صورتی برابر با یک خواهد بود که تقاضای بین i و j سرویس داده شود. مطابق با نشریه ۷۷۷ سازمان برنامه و بودجه کشور [۲۷] و کتاب تکنولوژی و سیستم‌های حمل و نقل همگانی [۲۸] فاصله بین دو گره متوالی در خطوط BRT در بازه ۵۰۰ تا ۸۰۰ متر قرار دارد. در این مدل تمامی کمان‌هایی که در این شرط صدق نمی‌کنند از مجموعه کمان‌ها یعنی E (مجموعه جواب‌های شدنی) حذف می‌شوند. شایان ذکر است که کلیات این مدل از مقاله گوتییرز جارپا و همکاران (۲۰۱۳) آورده شده [۱۶] که تابع هدف آن تغییر نموده و تبدیل به یک تابع هدف غیرخطی (نسبت تقاضای پوشش داده شده به هزینه ساخت) شده‌است.

$$\max z_t = \frac{\sum_{i,j\in N^s: i<j} \left(t_{ij}+t_{ji}\right) v_{ij}}{\sum_{s\in S}\sum_{i,j\in N_s} c_{ij} x_{ij}^{s}} \quad (۱)$$

$$\sum_{i\in T_k}\sum_{j\in N_s\setminus T_k} \left(x_{ij}^{s}+x_{ji}^{s}\right) \geq 1; \forall k\in K, s\in O_k \quad (۲)$$

$$\sum \left(x_{ij}^{s}+x_{ji}^{s}\right) = 2w_i^{s} - y_i; \forall s\in S, i\in N_s \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in T_k} y_i = 1; \forall k\in K \quad (۴)$$

$$w_i^s + w_j^s \le 1; \forall s \in S, and i, j \in N_s : i > j, and d_{ij} < l_{ij} \quad (۵)$$

$$v_{ij} \le \sum_{s \in S} w_i^s; i, j \in N^s : i < j \quad (۶)$$

$$v_{ij} \le \sum_{s \in S} w_j^s; i, j \in N^s : i < j \quad (۷)$$

$$\sum_{i,j \in Q} x_{ij}^s \le \sum_{t \in Q \setminus \{q\}} w_t^s; \forall s \in S, Q \subseteq N^s, q \in Q : |Q| > 2 \quad (۸)$$

$$x_{ij}^s \in \{0,1\}; \forall (i, j) \in E, s \in S \quad (۹)$$

$$v_{ij} \in \{0,1\}; \forall i, j \in N : i < j \quad (۱۰)$$

$$y_i \in \{0,1\}; \forall i \in N^s \quad (۱۱)$$

$$w_i^s \in \{0,1\}; \forall s \in S, i \in N^s \quad (۱۲)$$

رابطه (۱) تابع هدف مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی پیشنهادی هستند که نشان‌دهنده کمینه کردن هزینه ساخت و بیشینه کردن تقاضای سرویس داده شده هستند. روابط (۲) و (۳) پیوستگی شبکه را تضمین می‌نمایند و قید (۴) تضمین می‌کند که در نواحی تبادلی تنها یک گره مشترک به عنوان تبادل بین قطعه‌های مختلف عمل نماید. قید (۵) تضمین می‌کند که در یک قطعه فاصله دو ناحیه متوالی از مقدار حداقل بیشتر باشد. قیدهای (۶) و (۷) تضمین می‌نماید تنها در صورتی تقاضای بین دو گره سرویس داده شود که در مسیر طراحی شده قرار داشته باشند. قید (۸) زیر حلقه‌ها را از مجموعه جواب حذف می‌نماید و قیدهای (۹) تا (۱۲) دوتایی بودن متغیرهای تصمیم را تضمین می‌نمایند.

به منظور حل مدل ارائه شده، از یک روش ابتکاری پیشنهادی استفاده می‌گردد. این روش به طور کلی شامل دو مرحله است. در مرحله اول کریدروهای خطوط اتوبوس تندرو با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برونو و همکاران[1] در سال ۲۰۰۴ [۱۱] طراحی می‌گردد. در مرحله دوم سعی می‌گردد برای گره‌های انتخابی در مرحله اول از همسایگان آن‌ها گره جایگزین به نحوی پیدا گردد تا مقدار تابع هدف بهبود یابد. این مرحله تا زمانی که تابع هدف همگرا شود یا زمانی که گره جدید جایگزین گره موجود نگردد، ادامه خواهد یافت.

در مطالعات پیشین برای محاسبه جمعیت یا تقاضای پوشش داده شده، ابتدا فرض می‌شد که تمامی ویژگی‌های یک ناحیه ترافیکی در مرکز آن ناحیه متمرکز شده و سپس فواصل مراکز نواحی ترافیکی از محل پیشنهادی ایستگاه محاسبه می‌گردید و چنانچه فاصله آن مرکز ناحیه از محل پیشنهادی ایستگاه کمتر از فاصله پیاده‌روی مطلوب بود، با استفاده از روابط مختلف مطرح شده، میزان پوشش را محاسبه می‌نمودند. اشکال اصلی که می‌توان به این روش رایج وارد نمود این است که چنانچه بخش‌های زیادی از یک ناحیه فرضی در شعاع پیاده‌روی مطلوب ایستگاه قرار می‌گرفت، اما مرکز آن ناحیه در شعاع پیاده‌روی مطلوب قرار نمی‌گرفت، فرض می‌شد این ناحیه توسط ایستگاه مورد نظر پوشش داده نمی‌شود. برای رفع این مشکل در این پژوهش روشی جدید برای محاسبه پوشش تقاضا پیشنهاد می‌گردد. برای ناحیه‌بندی ترافیکی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین شرایط این است که در یک ناحیه بافت شهر، نوع کاربری‌ها و ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی باید تقریبا یکسان باشد. در روش پیشنهادی در این پژوهش نیز از همین فرض اساسی استفاده می‌گردد. بدین صورت که فارغ از آنکه مرکز ناحیه در شعاع پیاده‌روی مطلوب قراردارد یا خیز، ابتدا کل تقاضای سفر (تولید یا جذب سفر) بر مساحت

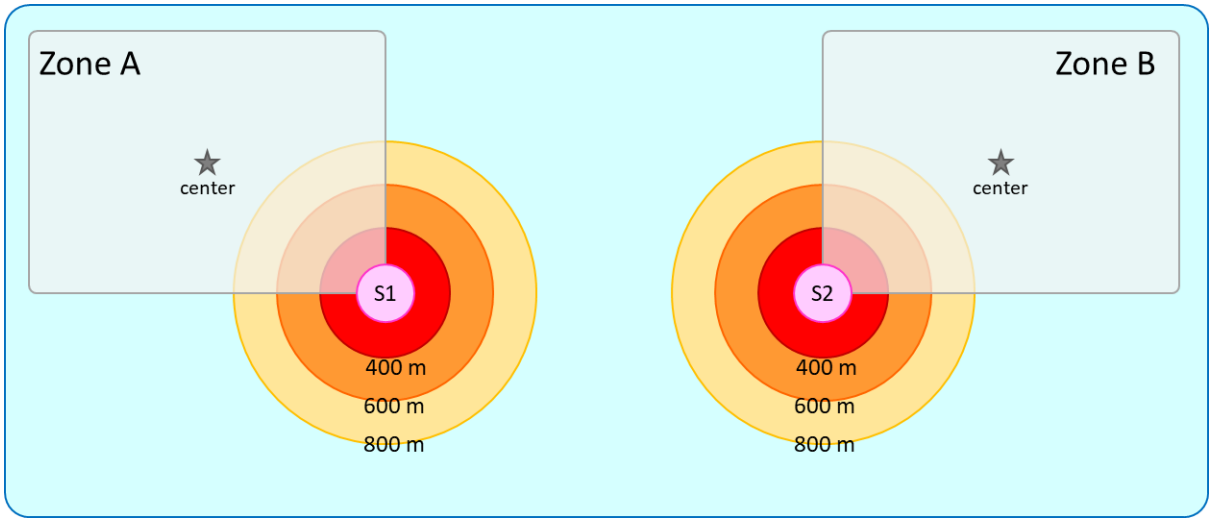
[1] Bruno el al.

ناحیه تقسیم نموده و سپس حول ایستگاه مورد نظر بافرهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ متری در نظر گرفته می‌شود، سپس با توجه به نسبت مساحت پوشش داده شده و فاصله مرکز هندسی این سطح جدید از ایستگاه میزان پوشش تقاضای سفر محاسبه می‌گردد. در جدول ۲ ضریب پوشش تقاضا آورده شده است و برای روشن‌تر شدن روش پیشنهادی، میزان تقاضای پوشش داده شده توسط ایستگاه‌های فرضی S1 و S2 شکل ۱ در جدول ۳ محاسبه گردیده است. برای این منظور فرض می‌گرد کل تقاضای سفر از ناحیه A به B برابر با ۲۰۰۰۰ سفر و کل تقاضای سفر از ناحیه B به A برابر با ۱۵۰۰۰ سفر و مساحت کل ناحیه‌های A و B برابر با ۵ میلیون متر مربع است. بر اساس نتایج نشان داده شده دراین مثال فرضی بسیار ساده، مشخص می‌گردد که بخشی از سفرهای بین نواحی A و B توسط ایستگاه‌های S1 و S2 مطابق با روش پیشنهادی پوشش داده می‌شوند، در حالی که مطابق با روش‌های رایج مطرح شده در ادبیات تخصصی، به دلیل آنکه فاصله مرکز ناحیه‌های مبدا و مقصد از ایستگاه‌های S1 و S2 (مطابق با شکل ۱) بیشتر از ۸۰۰ متر است، هیچ تقاضایی از این نواحی پوشش داده نمی شود. به طور کلی از آنجا که این روش پیشنهادی تقاضای پوشش داده شده را بر اساس مساحت پوشش داده شده نواحی در بافرهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ متری محاسبه می‌نماید، دقت بسیار بیشتری نسبت به روش‌های پیشین خواهد داشت.

به منظور حل این مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده، یک روش دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌گردد. کلیات این روش بدین صورت است که ابتدا خطوط سامانه اتوبوسرانی تندرو با روش مطرح شده توسط برونو و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۱۱] طراحی می‌گردد و سپس بعد از این مرحله، هر یک از نواحی شبکه (نواحی منتخب) با همسایگان خود که در شبکه طراحی شده انتخاب نشده‌اند، جا به جا می‌شوند، و سپس مقدار تابع هدف برای شرایط محاسبه و قیدهای مساله کنترل می‌گردد، چنانچه این همسایه بتواند مقدار تابع هدف را بهبود ببخشد و در تمامی قیدهای مطرح شده صدق نماید، جایگزین همسایه منتخب خود در شبکه نهایی خواهد شد. این مرحله تا زمانی ادامه خواهد یافت که مقدار تابع هدف به مقداری ثابت همگرا شود (تغییرات آن ناچیز باشد) یا اینکه هیچ یک از نواحی منتخب با همسایه خود جایگزین نگردد. فرآیند حل مدل ارائه شده جهت طراحی شبکه سامانه اتوبوسرانی تندرو در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

جدول ۲: ضریب تقاضای پوشش داده شده بر اساس فاصله ناحیه مبدا و مقصد از ایستگاه ابتدا و انتها

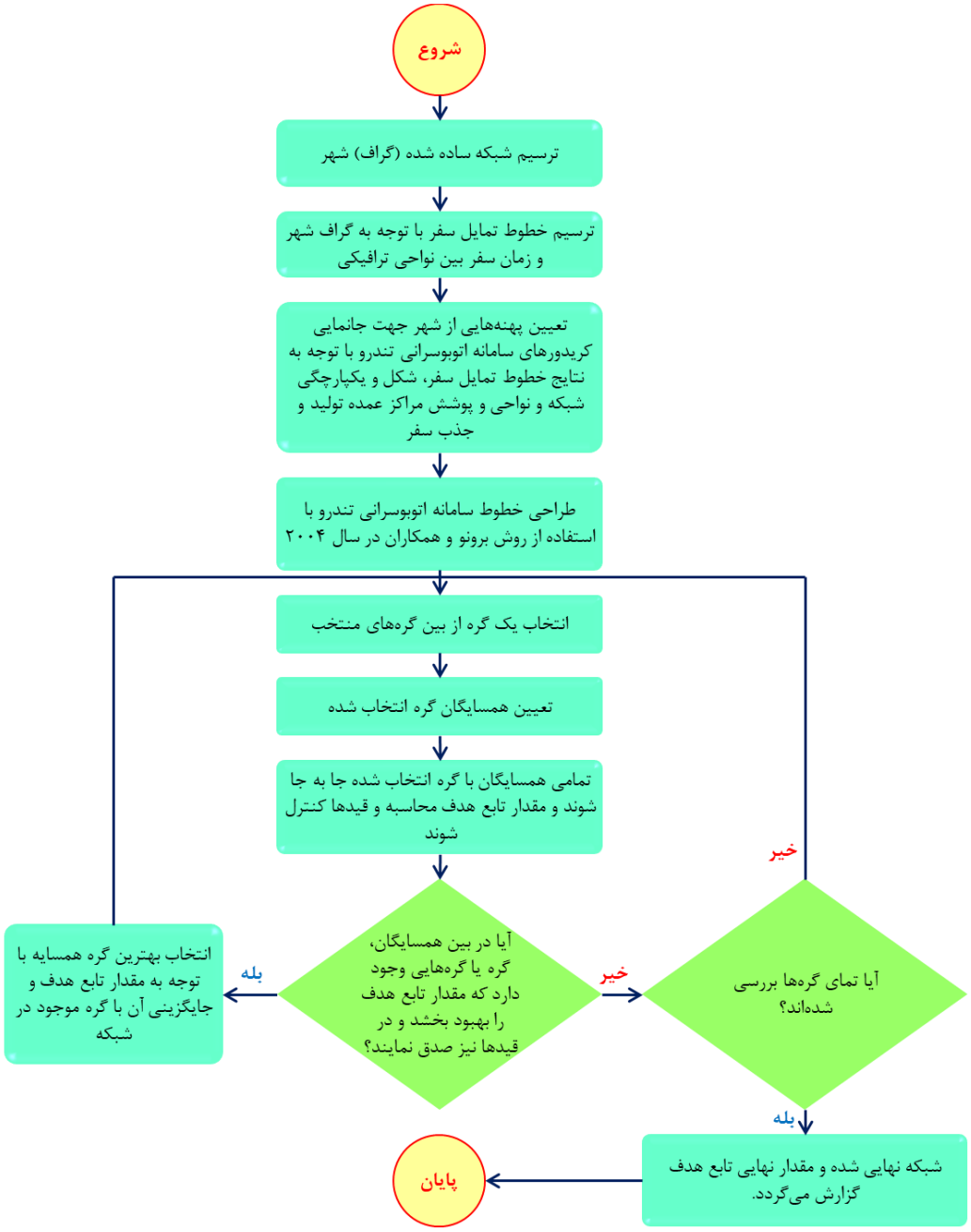
	فاصله مقصد سفر از ایستگاه پایانی سفر			
فاصله مبدا سفر از ایستگاه شروع سفر	**کمتر از ۴۰۰ متر (پوشش ۱۰۰٪)**	**بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر (پوشش ۵۰٪)**	**بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر (پوشش ۲۵٪)**	**بیش از ۸۰۰ متر (فاقد پوشش)**
کمتر از ۴۰۰ متر (پوشش ۱۰۰٪)	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰
بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر (پوشش ۵۰٪)	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۰
بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر (پوشش ۲۵٪)	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۶۲۵	۰
بیش از ۸۰۰ متر (فاقد پوشش)	۰	۰	۰	۰



شکل ۱: ایستگاه فرضی S1 و S2 و سطح پوشش داده شده از نواحی ترافیکی A و B

جدول ۳: محاسبه تقاضای پوشش داده شده نواحی ترافیکی A و B توسط ایستگاه‌های S1 و S2

	ناحیه ترافیکی A	ناحیه ترافیکی B
سطح پوشش داده شده در بافر ۴۰۰ متری (متر مربع)	۱۲۵،۶۰۰	۱۲۵،۶۰۰
سطح پوشش داده شده در رینگ ۶۰۰ متری (متر مربع)	۱۵۷،۰۰۰	۱۵۷،۰۰۰
سطح پوشش داده شده در رینگ ۸۰۰ متری (متر مربع)	۲۱۹،۸۰۰	۲۱۹،۸۰۰
نسبت مساحت پوشش داده شده در بافر ۴۰۰ متری به کل ناحیه (٪)	۲/۵۱۲	۲/۵۱۲
نسبت مساحت پوشش داده شده در رینگ ۶۰۰ متری به کل ناحیه (٪)	۳/۱۴۰	۳/۱۴۰
نسبت مساحت پوشش داده شده در بافر ۸۰۰ متری به کل ناحیه (٪)	۴/۳۹۶	۴/۳۹۶
تولید سفر پوشش داده شده در بافر ۴۰۰ متری میزان پوشش ۱۰۰ درصد (سفر)	۵۰۲	۳۷۷
تولید سفرپوشش داده شده در رینگ ۶۰۰ متری میزان پوشش ۵۰ درصد (سفر)	۳۱۴	۲۳۶
تولید سفر پوشش داده شده در رینگ ۸۰۰ متری میزان پوشش ۲۵ درصد (سفر)	۲۲۰	۱۶۵
کل تولید سفر پوشش داده شده	۱۰۳۶	۷۷۸
فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده در بافر ۴۰۰ متری از ایستگاه (متر)	۲۴۰	۲۴۰
فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده در رینگ ۶۰۰ متری از ایستگاه (متر)	۴۹۴	۴۹۴
فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده در رینگ ۸۰۰ متری از ایستگاه (متر)	۶۸۷	۶۸۷
فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده درناحیه تحت پوشش از ایستگاه شروع (متر)	۴۱۲	۴۱۲
فاصله مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده درناحیه تحت پوشش از ایستگاه پایان (متر)	۴۱۲	۴۱۲
تقاضای پوشش داده شده از ناحیه A به B (سفر)	۲۵۹	
تقاضا پوشش داده شده از ناحیه B به A (سفر)	۱۹۵	



شکل ۲: فرآیند پیشنهادی جهت طراحی شبکه سامانه اتوبوسرانی تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر

۴- تحلیل و بررسی نتایج

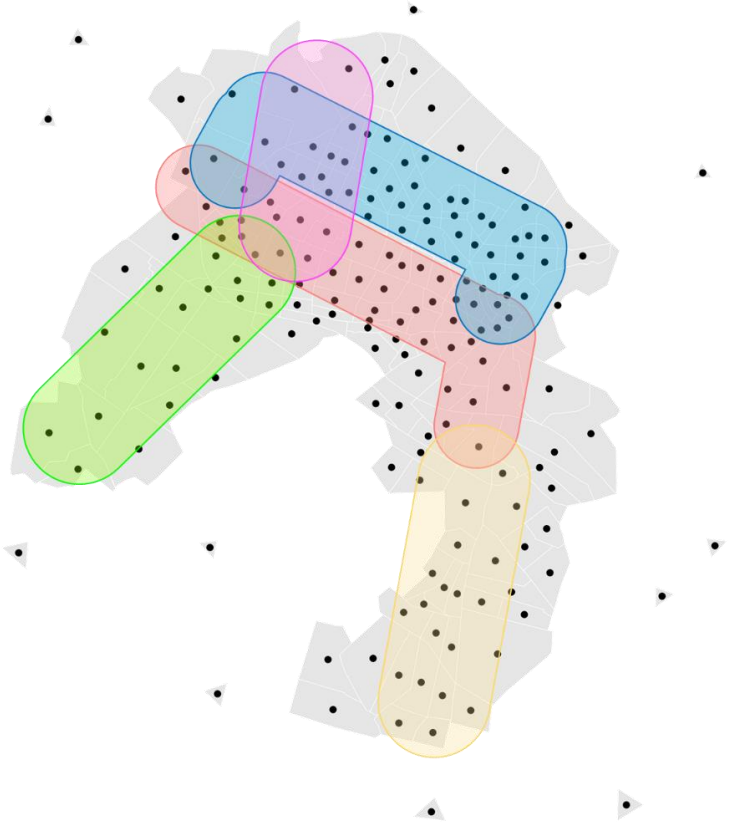
در این پژوهش هدف طراحی شبکه سامانه اتوبوسرانی تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر است که به این منظور اطلاعات و داده‌های شهر کرج ایران استفاده می‌گردد. کرج مرکز استان البرز، مرکز شهرستان کرج، به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران شناخته می‌شود. مطابق با نتایج سر شماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ این شهر با بیش از یک میلیون ۵۹۰ هزار نفر جمعیت چهارمین شهر پرجمعیت ایران و بیست و دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است [۲۸]. شبکه ساده شده شهر کرج (گراف نواحی ترافیکی) در شکل ۳ و خطوط تمایل سفر کرج نیز با توجه تقاضای سفر این شهر در سال ۱۴۱۰ در شکل ۴ به تصویر کشیده شده‌اند.

شهر کرج در فاصله حدودا ۲۵ کیلومتری تهران قرارداد و بسیاری از ساکنین این شهر برای کار و فعالیت در ساعات صبح به سمت تهران حرکت می‌نمایند. از این رو مطابق شکل ۴ برخی از خطوط تمایل سفر به سمت سه ایستگاه مترو تهران – کرج خواهد بود. بر اساس خطوط تمایل سفر ترسیم شده، کاربری‌های عمده تولید و جذب سفر و همچنین شکل شبکه پهنه‌هایی از شهر کرج که مناسب جانمایی کریدورهای سامانه اتوبوسرانی تندرو هستند، مطابق با شکل ۵ تعیین می‌گردند.

بر اساس شاخص‌های ذکر شده، پهنه قرمز رنگ به نحوی در نظر گرفته شده استکه از محدوده کمالشهر و دانشگاه خوارزمی شروع شده و به ایستگاه مترو کرج ختم می‌گردد. هدف از طراحی پهنه سبز رنگ پوشش نواحی مهرشهر و متصل نمودن این نواحی به ایستگاه گلشهر کرج است. پهنه آبی رنگ نیز به نحوی در نظر گرفته شده است، که علاوه بر پوشش دانشگاه خوارزمی و دانشگاه آزاد کرج و محله گوهردشت در محدوده مرکزی شهر کرج برای حفظ یکپارچگی شبکه دوباره به خط قرمز متصل گردد. هدف از پهنه صورتی رنگ پوشش نواحی شمال غربی شهر کرج همانند باغستان و بیمارستان البرز و متصل نمودن این نواحی به ایستگاه مترو گلشهر است. در نهایت پهنه زرد رنگ نیز به نحوی جانمایی شده که علاوه بر پوشش محدوده فردیس این نواحی را به ایستگاه مترو کرج متصل نماید.

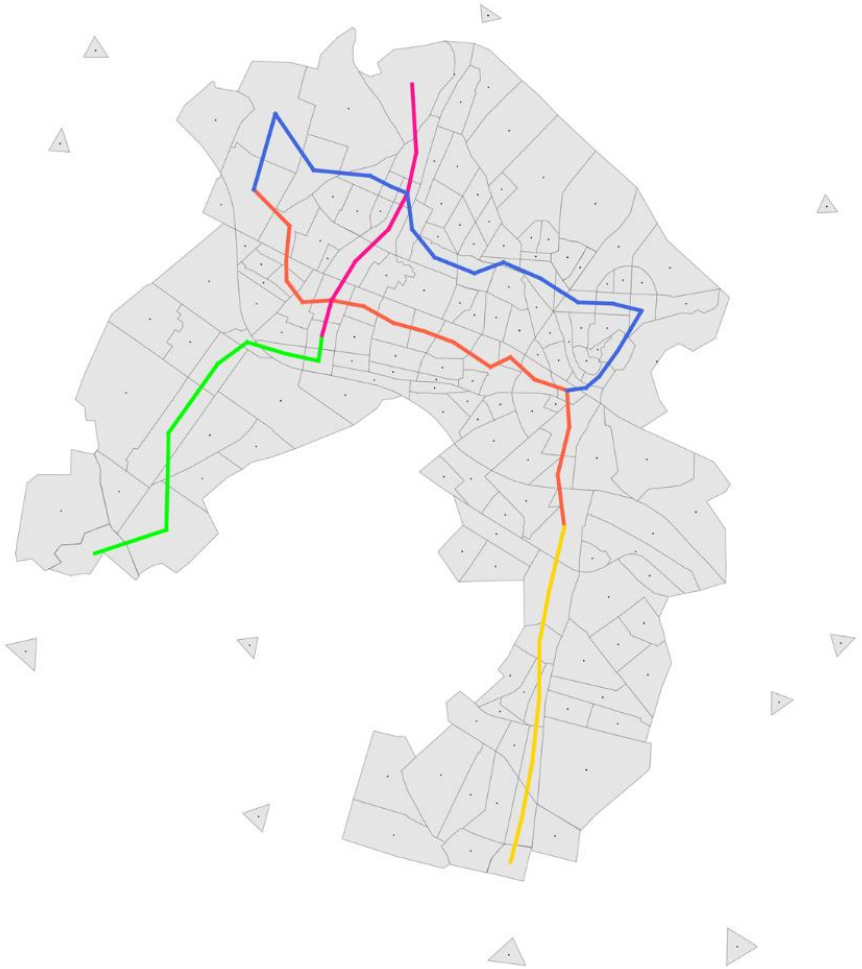
شکل ۳: گراف ساده نواحی ترافیکی شهر کرج

شکل ۴: خطوط تمایل سفر شهر کرج



شکل ۵: پهنه‌های تعیین شده برای جانمایی کریدورهای سامانه اتوبوسرانی تندرو

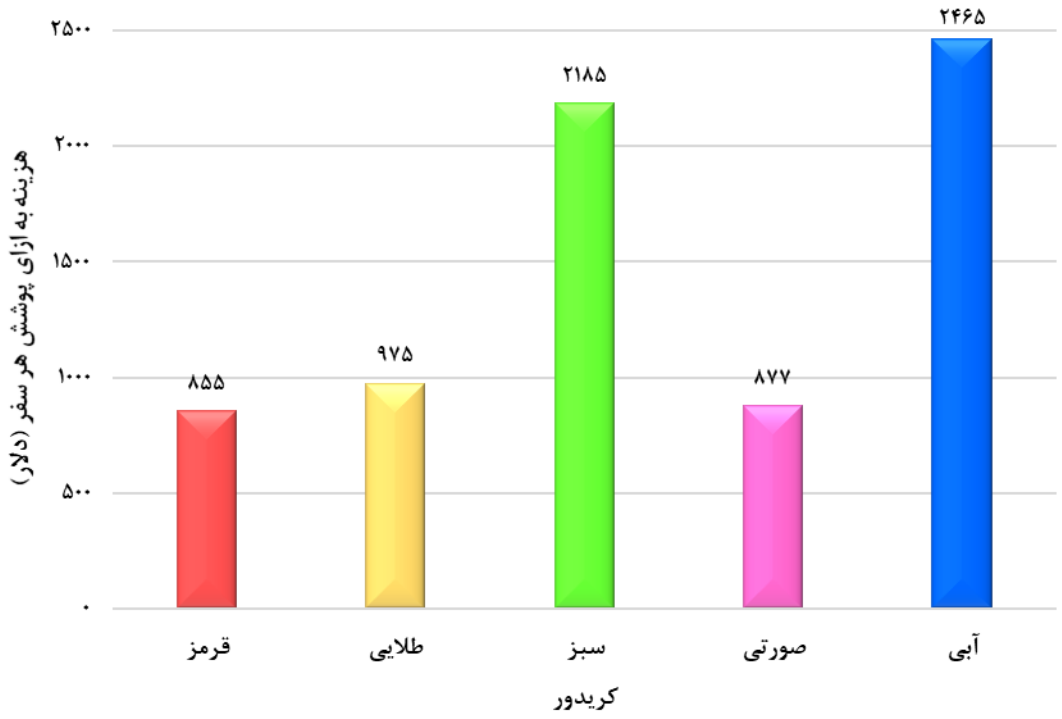
در شکل ۶ نتایج کریدورهای طراحی شده نمایش داده شده است که جزئیات بیشتر آن در جدول ۴ آورده شده است. براساس تجربیات موجود در ایران و همچنین نشریه ۷۷۷ سازمان برنامه و بودجه کشور هزینه ساخت هر کیلومتر خط اتوبوس تندرو برابر با ۵ میلیون دلار در نظر گرفته شده است. بر اساس اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهر کرج، در یک ساعت اوج صبح سال ۱۴۱۰ در شهر کرج حدود۷۸۲ هزار سفر انجام می‌گردد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۴ می‌توان گفت حدود ۲۸/۷ درصد از سفرهای انجام شده در یک ساعت اوج صبح توسط این کریدورها پوشش داده می‌شود. شایان ذکر است که در این پژوهش مطابق با مبانی مطرح شده در ادبیات تخصصی، پوشش تقاضای سفر برای هر کریدور و کل شبکه محاسبه گردیده است و برای محاسبه تقاضای جذب شده به هر خط و کل شبکه سامانه اتوبوسرانی تندرو باید، از روش‌های موجود برای تفکیک شیوه سفر و تخصیص ترافیک استفاده نمود و سپس تقاضای دقیق هر خط مشخص گردد. بر اساس این نتایج مشخص می‌گردد کریدور قرمز بیشترین و کریدرو سبز کمترین پوشش تقاضا را به خود اختصاص داده‌اند. کریدور آبی رنگ نیز با پوشش تقاضای ۳۳/۶ هزار مسافر در بین کریدورهای طراحی شده بیشترین طول و بیشترین هزینه ساخت را دارد. در شکل ۷ میزان هزینه احداث به ازای پوشش هر سفر به تفکیک کریدورهای طراحی شده به تصویر کشیده شده است که بر اساس آن مشخص می‌گردد کریدور قرمز با هزینه ۸۵۵ دلار به ازای هر سفر پوشش داده شده، کمترین میزان هزینه ساخت به ازای پوشش یک سفر را دارد. همچنین بر اساس این شکل مشخص می‌گردد علی رغم اینکه تعداد سفر پوشش داده شده توسط کریدور صورتی کمتر از کریدور طلایی است، اما در مقایسه با یک دیگر به ازای پوشش هر سفر، کریدور صورتی رنگ ۹۸ دلار هزینه کمتری دارد. هزینه ساخت به ازای پوشش هر سفر برای کریدورهای آبی و سبز، بیش از دو برابر سایر کریدورها است. از لحاظ این شاخص بر اساس نتایج شکل ۷ مشخص می‌گردد بدترین شرایط را کریدور آبی رنگ با هزینه ۲۴۶۵ دلار به ازای هر سفر پوشش داده شده دارد.



شکل ۶: کریدورهای طراحی شده برای سامانه اتوبوسرانی تندرو

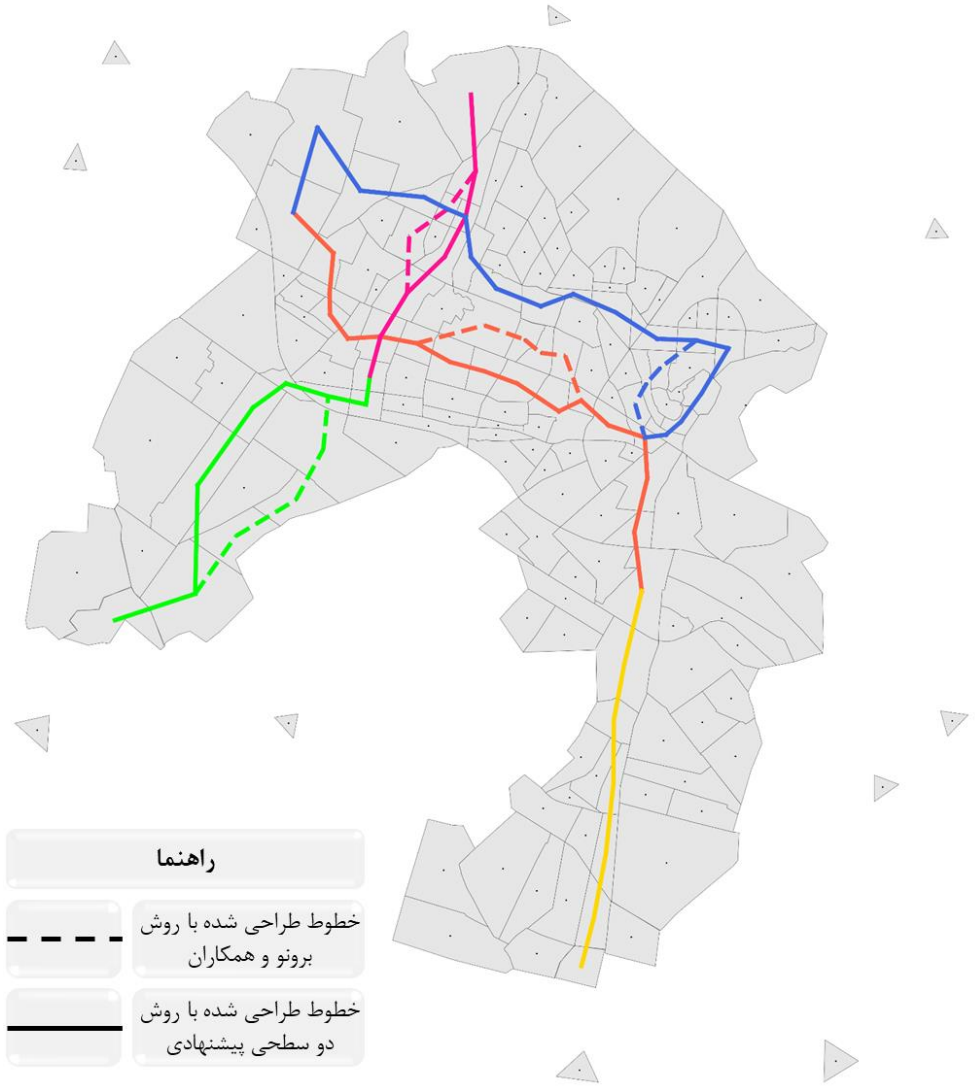
جدول ۴: نتایج طراحی کریدورهای سامانه اتوبوسرانی تندرو شهر کرج

کریدور	پوشش تقاضا (سفر)	طول (متر)	هزینه ساخت (میلیون دلار)
قرمز	۸۴۰۶۱	۱۴۳۷۵	۷۱/۹
طلایی	۴۴۱۰۷	۸۵۹۶	۴۳/۰
سبز	۲۲۷۴۵	۹۹۳۹	۴۹/۷
صورتی	۴۰۱۳۵	۷۰۳۹	۳۵/۲
آبی	۳۳۵۵۱	۱۶۵۳۶	۸۲/۷
جمع کل	۲۲۴۵۹۹	۵۶۴۸۵	۲۸۲/۵



شکل ۷: نسبت هزینه ساخت هر خط به ازای پوشش یک تقاضای سفر

به منظور مقایسه روش حل پیشنهادی با روش حل برونو و همکاران (۲۰۰۴)، در شکل ۸ مقایسه خطوط طراحی شده با دو روش آورده شده است. مطابق با این شکل مشخص می‌گردد، به جز کریدور سبز رنگ در بخش‌های بسیاری از کریدورهای دیگر، جواب‌های هر دو روش نزدیک و مشابه به یک دیگر است. همچنین در جدول ۵ نیز نتایج طراحی شبکه با استفاده از هر دو روش آورده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است کریدور طلایی در هر دو روش حل نتایج مشابهی دارد، اما سایر کریدورها تغییراتی خواهند داشت. بر اساس نتایج جدول ۵ مشخص می‌گردد در صورتی که مدل پیشنهادی با استفاده از روش پیشنهادی حل گردد، مقدار تابع هدف به نسبت روش برونو و همکاران بیش از ۸/۳ درصد بهبود می‌یابد که این نتایج حاکی از معتبر بودن روش حل پیشنهادی و بهتر بودن آن نسبت به روش حل برونو و همکاران (۲۰۰۴) است.



شکل ۸- مقایسه شکل شبکه اتوبوسرانی تندرو طراحی شده با روش پیشنهادی و روش برونو و همکاران

جدول ۵: مقایسه نتایج نتایج طراحی شبکه با روش پیشنهادی و روش برونو و همکاران

کریدور	روش پیشنهادی دو سطحی		روش برونو و همکاران (۲۰۰۴)	
	پوشش تقاضا (سفر)	هزینه ساخت (میلیون دلار)	پوشش تقاضا (سفر)	هزینه ساخت (میلیون دلار)
قرمز	۸۴۰۶۱	۷۱.۹	۷۸۲۴۱	۷۳.۲
طلایی	۴۴۱۰۷	۴۳	۴۴۱۰۷	۴۳
سبز	۲۲۷۴۵	۴۹.۷	۱۷۳۴۵	۵۰.۲
صورتی	۴۰۱۳۵	۳۵.۲	۳۸۷۲۱	۳۶.۸
آبی	۳۳۵۵۱	۸۲.۷	۳۱۱۵۷	۸۲.۲
جمع کل	۲۲۴۵۹۹	۲۸۲.۵	۲۰۹۵۷۱	۲۸۵.۴
مقدار تابع هدف	۷۹۵		۷۳۴	

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شیوه اتوبوسرانی تندرو یکی از شیوه‌های بسیار مهم در بسیاری از کلان‌شهرها محسوب می‌گردند که می‌توانند تعداد مسافران بسیار زیادی را سرویس‌دهی نمایند. از این‌رو توسعه این زیرساخت مورد توجه بسیاری از مدیران و برنامه‌ریزان شهری بوده است. در پژوهش جاری سعی گردید تا با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیر خطی با هدف بیشینه کردن تقاضای پوشش داده شده و کمینه کردن هزینه ساخت، شبکه اتوبوسرانی تندرو طراحی شود. برای نیل به این هدف از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهر کرج در سال افق ۱۴۱۰ استفاده گردید. در این پژوهش علاوه‌بر ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیر خطی، یک روش جدیدی جهت محاسبه تقاضای پوشش داده شده و همچنین یک روش جدید دو سطحی به منظور حل مدل پیشنهادی ارائه گردید. برای محاسبه تقاضای پوشش داده شده از روش دوایر هم مرکز استفاده شد، بدین صورت که ابتدا سه دایره با شعاع‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ متر حول ناحیه منتخب برای احداث ایستگاه در نظر گرفته می‌شود، سپس فرض می‌گردد بخش‌هایی از ناحیه ترافیکی که در شعاع ۴۰۰ متری قرار دارند به صورت کامل (پوشش ۱۰۰ درصد تقاضا) پوشش داده می‌شوند، اما برای بخش‌هایی که در فاصله ۴۰۰ تا ۶۰۰ متری قراردارند و بخش‌هایی که درفاصله ۶۰۰ تا ۸۰۰ متری قرار دارند، به ترتیب ۵۰ و ۲۵ درصد تقاضای سفر پوشش داده می‌شود. در نهایت با توجه پوشش سفرها در هر یک از بخش‌های ناحیه ترافیکی مورد نظر، مرکز ثقل سفرهای پوشش داده شده در ناحیه ترافیکی مورد نظر محاسبه می‌شود. در نهایت براساس فاصله مرکز ثقل ناحیه مبدا از ایستگاه شروع و همچنین فاصله مرکز ثقل ناحیه مقصد از ایستگاه پایان میزان تقاضای پوشش داده شده توسط کریدور اتوبوسرانی تندرو محاسبه می‌گردد. در این پژوهش به منظور حل مدل نیز یک روش دو سطحی استفاده شده است که در مرحله اول ابتدا کریدورهای سامانه اتوبوسرانی تندرو با استفاده از روش برونو و همکاران (۲۰۰۴) طراحی و سپس بعد از تکمیل مرحله اول طراحی شبکه، در مرحله دوم چنانچه در بین همسایه‌های گره‌های منتخب، گره‌ای وجود داشته باشد که جا به جایی آن با گره منتخب باعث بهبود تابع هدف گردد و قیدهای مساله پا برجا بمانند، این جا به جایی صورت خواهد گرفت و در طراحی شبکه لحاظ خواهد شد. این مرحله تا زمانی که تابع هدف همگرا شود یا دیگر ناحیه جدید وارد شبکه نشود ادامه خواهد یافت. بر اساس موارد یاد شده شبکه اتوبوسرانی تندرو کرج طراحی گردید که اهم نتایج آن مطابق با موارد زیر است:

۱. بر اساس نتایج خطوط تمایل سفر، کاربری‌های عمده تولید و جذب سفر و همچنین شکل و یکپارچگی شبکه، برای شهر کرج ۵ کریدور مختلف اتوبوس تندرو در نظر گرفته شد که نتایج حاکی از آن است این کریدورها جمعا ۲۴۴/۶ هزار سفر را معادل ۲۸/۷ درصد کل سفرهای یک ساعت اوج صبح شهر کرج در سال ۱۴۱۰ را پوشش می‌دهند. هزینه ساخت برآورد شده برای این کریدورها در کل برابر با ۲۸۲/۵ میلیون دلار برآورد شده است.

۲. کریدور قرمز با طول ۱۴/۴ کیلومتر و هزینه ساخت تقریبی ۷۱/۹ میلیون دلار۸۴۰۶۱ هزار سفر را پوشش می‌دهد. بر اساس نتایج مشخص می‌گردد برای پوشش هر سفر به میزان ۸۵۵ دلار باید در این خط سرمایه گذاری گردد.

۳. کریدوهای قرمز، صورتی و طلایی به ترتیب کمترین میزان سرمایه گذاری به ازای پوشش هر سفر را دارند (کمتر از هزار دلار به ازای هر سفر) در حالی که کریدورهای آبی و سبز به ترتیب نیازمند بیشترین میزان سرمایه گذاری به ازای پوشش هر سفر هستند.

در این پژوهش به منظور محاسبه تقاضای پوشش داده شده با توجه به محدودیت‌های اطلاعاتی موجود روشی جدید پیشنهاد گردید، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای طراحی برای طراحی خطوط اتوبوس تندرو، برای محاسبه تقاضای پوشش داده شده از مدل‌های تفکیک شیوه سفر جهت لحاظ کردن رقابت این شیوه با سایر شیوه‌های سفر استفاده گردد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری کرج و همچنین شرکت مهندسان مشاور اندیشکار به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات شهر کرج تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

[1] Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 135(8), 491-505.

[2] Zhang, L., Lu, J., Yue, X., Zhou, J., Li, Y., & Wan, Q. (2018). An auxiliary optimization method for complex public transit route network based on link prediction. *Modern Physics Letters B*, 32(05), 1850066.

[3] Xiong, J., Chen, B., Chen, Y., Jiang, Y., & Lu, Y. (2019). Route network design of community shuttle for metro stations through genetic algorithm optimization. *IEEE Access*, 7, 53812-53822.

[4] Fu, X., & Lam, W. H. (2018). Modelling joint activity-travel pattern scheduling problem in multi-modal transit networks. *Transportation*, 45(1), 23-49.

[5] Ceder, A., & Wilson, N. H. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331-344.

[6] Ceder, A., & Israeli, Y. (1993). Design and evaluation of transit routes in urban networks. *In Proceedings of the 3rd international conference on competition and ownership in surface passenger transport*, Ontario, Canada.

[7] Israeli, Y., & Ceder, A. (1995). Transit route design using scheduling and multiobjective programming techniques. *In Computer-aided transit scheduling. Springer*, Berlin, Heidelberg, 56-75.

[8] Dufourd, H., Gendreau, M., & Laporte, G. (1996). Locating a transit line using tabu search. *Location Science*, 4(1-2), 1-19.

[9] Pattnaik, S. B., Mohan, S., & Tom, V. M. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 124(4), 368-375.

[10] Bielli, M., Caramia, M., & Carotenuto, P. (2002). Genetic algorithms in bus network optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(1), 19-34.

[11] Bruno, G., Gendreau, M., & Laporte, G. (2002). A heuristic for the location of a rapid transit line. *Computers & Operations Research*, 29(1), 1-12.

[12] Zhao, F., Ubaka, I., & Gan, A. (2005). Transit network optimization: Minimizing transfers and maximizing service coverage with an integrated simulated annealing and tabu search method. *Transportation research record*, 1923(1), 180-188.

[13] Yang, Z., Yu, B., & Cheng, C. (2007). A parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 44-55.

[14] Zhao, F., & Zeng, X. (2008). Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 841-855.

[15] Szeto, W. Y., & Wu, Y. (2011). A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, 209(2), 141-155.

[16] Gutiérrez-Jarpa, G., Obreque, C., Laporte, G., Marianov, V. (2013). Rapid transit network design for optimal cost and origin–destination demand capture. *Computers & Operations Research*, 40(12), 3000-3009.

[17] Ouyang, Y., Nourbakhsh, S. M., & Cassidy, M. J. (2014). Continuum approximation approach to bus network design under spatially heterogeneous demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 68, 333-344.

[18] Nikolić, M., & Teodorović, D. (2014). *A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees*. Expert Systems with Applications, 41(16),7200-7209.

[19] Cancela, H., Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2015). Mathematical programming formulations for transit network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77,17-37.

[20] Cipriani, E., Fusco, G., Patella, S. M., Petrelli, M., & Quadrifoglio, L. (2019). Transit network design for small-medium size cities. *Transportation Planning and Technology*, 42(1), 84-97.

[21] Ahmed, L., Mumford, C., & Kheiri, A. (2019). Solving urban transit route design problem using selection hyper-heuristics. *European Journal of Operational Research*, 274(2), 545-559.

[22] Wang, C., Ye, Z., & Wang, W. (2020). A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design. *IEEE Access*, 8, 12154-12167.

[23] Momenitabar, M., & Mattson, J. (2021). A Multi-Objective Meta-Heuristic Approach to Improve the Bus Transit Network: A Case Study of Fargo-Moorhead Area. *Sustainability*, 13(19), 10885.

[24] Mahdavi, A. R., Mamdoohi, A., & Allahviranloo, M. (2021). A fuzzy approach for designing of subway lines, case study: development of the Tehran subway network. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9), 13-13.

[25] Durán-Micco, J., van Kooten Niekerk, M., & Vansteenwegen, P. (2022). Designing bus line plans for realistic cases-the Utrecht case study. *Expert Systems with Applications*, 187, 115918.

[26] Rajabi, R., Yakhchali, S., (2022), Cash Flow Optimization of Portfolio Considering Market Indices Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization, *Journal of Structural and Construction Engineering*, [online], Available at: https://www.jsce.ir/article_144890.html.

[27] Khajeh, A., Kiani, A., Seraji, M., Dashti, H., Optimization of structure using hybrid Harris hawks and genetic algorithm, *Journal of Structural and Construction Engineering*, [online], Available at:

https://www.jsce.ir/article_152908.html
[26] Code 777, (2019). Public Transportation Studies and Feasibility Studies for Rail Systems in Urban and Suburb Areas (Scope of Services), *Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization*.
[27] Vuchic, V. R. (2007). Urban transit systems and technology. *John Wiley & Sons*.