بهینه‌سازی یکپارچه تخصیص تراکم و کاربری زمین و طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی- موردپژوهی: منطقه ۲۲ تهران

بهرام امین‌زاده گوهرریزی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

آرمین جبارزاده، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران

سعید رستگار، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران

مهرداد رحمانی، دانشجوی دکتری، دانشکده شهرسازی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

بابک امین‌زاده گوهرریزی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم‌وصنعت ایران

E-mail: bahram.aminzadeh@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷ پذیرش: ۱۳۹۷ /۰۶/۱۲

چکیده

با توجه به شواهد موجود از برهم‌کنش میان دو حوزه برنامه‌ریزی شهری و حمل‌ونقل شهری و هم‌افزایی بالقوه ناشی از تصمیم‌گیری یکپارچه این دو حوزه در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار شهری، در این پژوهش مسئله تخصیص بهینه تراکم و کاربری و مکان‌یابی ایستگاه‌ها و کریدور حمل‌ونقل عمومی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی یکپارچه با اهداف چندگانه مدل‌سازی شده است. اهداف مدل با توجه به مبانی توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی، عبارتند از: بیشینه‌سازی تراکم سکونت و فعالیت تخصیص یافته به نواحی مجاور ایستگاه‌های حمل‌ونقل، کمینه‌سازی فاصله شاخص اختلاط کاربری از مقدار مطلوب و کمینه‌سازی هزینه‌های احداث سامانه حمل‌ونقل عمومی. متغیرهای تصمیم مدل شامل کاربری و تراکم تخصیص یافته و مکان‌یابی ایستگاه‌ها و مسیرهای بهینه سامانه حمل‌ونقل عمومی هستند و محدودیت‌هایی در قالب الزامات توسعه سامانه حمل‌ونقل، عدم مغایرت اساسی با طرح‌های شهری فرادست و محدودیت‌های زیست‌محیطی به مدل افزوده شده است. به منظور حل مدل و تبدیل آن به یک مدل بهینه‌سازی تک هدفه از رویکرد نیل به آرمان استفاده شده است. مدل و رویکرد پیشنهادی در نمونه‌ای موردی در منطقه ۲۲ تهران پیاده‌سازی و نتایج آن تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی همزمان کاربری و حمل ونقل می‌تواند به بهبود توام پوشش جمعیت، فعالیت و اختلاط کاربری در عین حفظ رقابت‌پذیری هزینه‌ای بیانجامد. گزینه انتخابی از مجموعه پاسخ‌های پارتویی مدل نشان‌دهنده بهبود ۱۲,۲ و ۲۰,۶ درصدی پوشش جمعیت و فعالیت و ۱۰,۲ درصدی اختلاط کاربری نسبت به متوسط گزینه‌های خبرگان در عین افزایش تنها ۲,۵ درصدی هزینه به نسبت متوسط هزینه پیاده‌سازی گزینه های خبرگان است.

واژه های کلیدی: برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی، برنامه‌ریزی کاربری زمین، بهینه‌سازی با اهداف چندگانه، توسعه پایدار شهری، توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی

۱. مقدمه

در رویکردهای سنتی که تا نیمه‌های قرن بیستم میلادی تداوم یافت، برنامه‌ریزی کاربری زمین و برنامه‌ریزی حمل و نقل عمومی، به صورت مجزا از هم انجام می‌شد و عمدتا برنامه‌ریزی حمل‌ونقل تابع برنامه‌ریزی کاربری زمین بود؛ به گونه‌ای که جمعیت و فعالیت توزیع شده در شهر به‌عنوان خروجی برنامه‌ریزی کاربری زمین، نقش ورودی برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل اعم از شبکه معابر و شبکه حمل‌ونقل عمومی را ایفا می‌کرد. با این حال امروزه مطالعات متعدد بیانگر اثرات متقابل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و کاربری بر یکدیگر بوده است [Waddle, 2011]. بر این اساس رویکردهای توسعه پایدار شهری مانند توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی کوشیده‌اند با لحاظ این برهم‌کنش، از طریق تمرکز سکونت و فعالیت در مجاورت سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی مطلوبیت شیوه‌های پایدار حمل‌ونقل را نسبت به استفاده از خودروی شخصی افزایش دهند و با حفظ سطح مطلوبی از اختلاط کاربری‌ها در نواحی ایستگاهی نیاز به سفرهای طولانی عموما خودرومحور را کاهش دهند. بنا بر یکی از متداول‌ترین تعاریف، توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی «یک باهمستان فشرده با کاربری‌های مختلط به مرکزیت یک ایستگاه حمل‌ونقل عمومی است که از طریق طراحی، ساکنین، شاغلین و خریداران را به کاهش استفاده از اتومبیل و استفاده از طرق دیگر حمل‌ونقل [شامل حمل‌ونقل عمومی، پیاده و دوچرخه] ترغیب می‌کند» [Bernick and Cervero, 1997]. تعاریف جدیدتر با تاکید بیشتر بر برهم‌کنش متقابل برنامه‌ریزی کاربری و حمل‌ونقل شهری و لزوم تصمیم‌گیری یکپارچه، توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی را «تجمیع و تمرکز توسعه شهری حول ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی به منظور پشتیبانی از استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی و توسعه سامانه حمل‌ونقل عمومی به منظور اتصال توسعه‌های موجود و برنامه‌ریزی شده» تعریف کرده‌اند [Bertolini et al. 2009]. سایر رویکردهای توسعه پایدار شهری مانند رشد هوشمند و نوشهرگرایی نیز با ادبیاتی متفاوت بر این برهم‌کنش و نقش آن در توسعه پایدار شهری تاکید داشته‌اند و همگی بر اصول مشترکی چون توسعه متراکم و مختلط حول ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، اتصال و دسترس‌پذیری پیاده/با دوچرخه به ایستگاه‌ها، افزایش مطلوبیت پیاده‌روی/دوچرخه‌سواری از طریق افزایش ایمنی، امنیت و جذابیت مسیرهای پیاده و دوچرخه مبتنی هستند [Grant and Tsenkova, 2012]. از میان اصول مختلف توسعه حمل و نقل عمومی محور، دو اصل «اختلاط کاربری‌ها» و «توسعه متراکم» در مجاورت ایستگاه‌ها (محدوده‌های قابل پیاده‌روی) مستلزم برنامه‌ریزی کل‌نگر و با لحاظ ظرفیت‌ها و محدودیت‌ها در مقیاس شهری/منطقه‌ای و سایر اصول مستلزم طراحی در مقیاس محلی با لحاظ ویژگی‌های محلات از منظر ساختار اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و تاریخی است.

از این رو در این پژوهش یک مدل یکپارچه مکان‌یابی ایستگاه‌ها و کریدور قطار شهری انبوه‌بر و تخصیص بهینه تراکم و کاربری بر مبنای اصول توسعه حمل‌ونقل عمومی محور ارائه شده است. مدل پیشنهادی دارای ۳ هدف کمینه‌سازی هزینه، بیشینه‌سازی پوشش حمل‌ونقل عمومی و بهینه‌سازی اختلاط کاربری‌ها در مجاورت ایستگاه‌ها است. مدل پیشنهادی در یک نمونه موردی واقعی در منطقه ۲۲ تهران پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ساختار ادامه مقاله بدین شرح می‌باشد: ادبیات موضوع به اختصار در بخش دوم معرفی شده است. روش تحقیق شامل تعریف مسئله ، مدل ریاضی، روش حل و نمونه موردی در بخش سوم و یافته‌های پژوهش (نتایج پیاده‌سازی مدل) در بخش چهارم ارائه شده است. تحلیل و بحث در خصوص نتایج در بخش پنجم و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی در بخش ششم ارائه شده است.

۲. ادبیات موضوع

مرور ادبیات در دو حوزه برنامه‌ریزی کاربری زمین و حمل‌ونقل عمومی نمایانگر خلاء وجود مدل‌های برنامه‌ریزی توامان کاربری زمین و حمل‌ونقل عمومی است. البته مدلسازی کاربری زمین و حمل و نقل شهری به طور عمومی، از دهه ۵۰ میلادی رواج یافت و مدل‌های متعددی مانند CATS، DMATS برای شهرهای بزرگی چون شیکاگو و دیترویت پیشنهاد شد[Gharib, 2015] با این حال در خصوص مدلسازی ریاضی ارتباط متقابل کاربری زمین و حمل و نقل عمومی، خلاءها بیشتر است، زیرا در این زمینه عمدتا به «الگوسازی» پرداخته شده است. از این رو در ادامه این بخش به معرفی مختصر پژوهش‌های صورت گرفته در هر یک از این دو حوزه پرداخته شده و سپس خلاءهای پژوهشی ادبیات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲-۱ برنامه‌ریزی کاربری و تراکم شهری

سابقه مدل‌سازی ریاضی مسایل تخصیص تراکم و کاربری شهری به اندکی بیش از یک دهه پیش باز می‌گردد. لین و گاو در نخستین و یکی از معدود پژوهش‌ها در زمینه مدل‌سازی تخصیص تراکم و کاربری در نواحی مجاور ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، مسئله تخصیص بهینه تراکم در مجاورت یک ایستگاه حمل‌ونقل عمومی مستقر را در قالب یک مسئله بهینه‌سازی با اهداف اقتصادی (بیشینه‌سازی تولید سفر با سامانه ریلی)، اجتماعی (کمینه‌سازی اختلاف تراکم و خدمات موجود میان نواحی ایستگاهی و غیر ایستگاهی) و زیست‌محیطی (بیشینه‌سازی نسبت خدمات به زیربنای تجاری و مسکونی) مدل‌سازی کردند [Lin and Gau, 2006]. متغیرهای تصمیم این مدل تراکم مسکونی و تجاری تخصیص یافته به هر بلوک بودند. چن و همکاران، مسئله تخصیص بهینه تراکم سکونت و اشتغال به نواحی مجاور یک کریدور حمل‌ونقل عمومی را در قالب یک مسئله چند هدفه با اهداف دسترس‌پذیری، مزایای اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و استفاده از حمل‌ونقل عمومی مدل‌سازی و سپس با استفاده از تکنیک تاپسیس، مدل را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک هدفه تبدیل کردند [Chen et al. 2012]. لی و همکاران تراکم بهینه یک ناحیه ایستگاهی یا آن‌طور که خود می‌نامند یک «دهکده حمل‌ونقل عمومی» را با هدف بیشینه‌سازی استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی مدل‌سازی کردند [Li et al. 2016]. متغیر تصمیم در این مدل، تخصیص یکی از انواع کاربری‌های نه‌گانه است. ما و همکارانش مسئله تخصیص کاربری و تراکم به نواحی مجاور ایستگاه‌ها را برای یک ایستگاه و در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای صحیح و اهداف چندگانه مدل‌سازی کردند. اهداف مدل شامل میزان استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی، فشردگی کاربری‌ها، درجه تعارض کاربری‌ها، دسترس‌پذیری و اثرات زیست‌محیطی و متغیرهای تصمیم آن شامل انتخاب نوع کاربری و تراکم تخصیص یافته به هر گرید است [Ma et al. 2018].

علاوه‌بر مدل‌های تخصیص بهینه تراکم بر مبنای اصول توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی، پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه مدل‌سازی تخصیص تراکم و کاربری بر مبنای دیگر جنبه‌های توسعه پایدار مانند ظرفیت تحمل زیست‌محیطی، ردپای زیست‌محیطی و کارآیی منابع آب و انرژی ارائه شده است که با توجه به قرابت مفهومی و روش‌شناختی با این پژوهش در ادامه به اختصار معرفی شده‌اند. اوه و همکاران از مفهوم ظرفیت تحمل زیست‌محیطی برای تخصیص تراکم شهری با هفت شاخص انرژی، فضای سبز، معابر، سامانه قطار زیرزمینی، منابع آب، تصفیه فاضلاب و بازیافت پسماند به‌عنوان معیارهای تعیین‌کننده ظرفیت تحمل زیست‌محیطی استفاده کردند [Oh et al. 2005]. بر این مبنا این پژوهشگران یک سامانه پشتیبان تصمیم مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی طراحی و از آن برای تخصیص بهینه تراکم در نمونه موردی منطقه‌ای از شهر سئول در کره جنوبی استفاده کردند. لی و اوه در پژوهشی دیگر بر مبنای همین نظریه، یک مدل تخصیص تراکم با هدف توسعه

پایدار شهری (میزان انتشار آلاینده دی‌اکسید نیتروژن) ارائه کردند [Lee and Oh, 2012]. هسیه و همکاران با تقسیم یک ناحیه شهری در سنگاپور به مجموعه‌ای از بلوک‌های هم‌شکل و هم‌اندازه، تعداد طبقات، نوع کاربری هر یک از این طبقات و همچنین نوع، اندازه و زمان استفاده از فناوری‌های تبدیل انرژی در هر بلوک را با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی خطی با اعداد صحیح مختلط محاسبه کردند. اهداف مدل شامل بیشینه‌سازی تراکم (تعداد طبقات) و کمینه‌سازی ردپای زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی و رویکرد مورد استفاده در تبدیل مدل به مدل تک هدفه رویکرد محدودیت اپسیلون بوده است [Hsieh et al. 2017] همانگونه که ملاحظه می‌شود، آنچه در تجارب پیشین به آن بیشتر پرداخته شده است، تاثیر افزایش تراکم در استفاده از حمل و نقل عمومی است که البته تلاش شده در بیشتر موارد، عوارض محیط زیستی آن کنترل شود. با این حال در مقاله حاضر، با استفاده توامان از تراکم و اختلاط کاربری به همراه حداقل سازی هزینه احداث حمل و نقل عمومی اثرات متقابل دو حوزه برنامه‌ریزی کاربری زمین و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی در مدل لحاظ شده است که در تجربیات پیشین نمونه مشخصی از آن وجود ندارد.

۲-۲ برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی

قدمت مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل به ویژه در مسایل طراحی شبکه معابر به مراتب بیشتر از کاربرد آن در مسایل تخصیص تراکم و کاربری بوده است [Steenbrink, 1974]. با وجود این و با توجه به ماهیت پیچیده مسایل طراحی شبکه، مقالات اولیه ناچار به ساده‌سازی بیش از حد مسئله و در نتیجه عدم انطباق کافی با شرایط دنیای واقعی بودند [Dantzig, et al. 1979]. در نتیجه تعداد پژوهش‌های منتشره در سال‌های نخست معدود و با کاربردهای بسیار محدود بودند. در سال‌های اخیر و با پیشرفت همزمان در قدرت پردازنده‌ها و به‌ویژه قابلیت‌های پردازش موازی و همچنین روش‌های حل دقیق و فراابتکاری تعداد پژوهش‌های مرتبط با طراحی شبکه حمل‌ونقل به لحاظ کمی و کیفی پیشرفت چشمگیری داشته است [Farahani, et al. 2013].

عمده پژوهش‌های پیشین در زمینه طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی معطوف به طراحی خطوط اتوبوس‌رانی بوده است. به عنوان نمونه فان و مچمل مسئله طراحی خطوط اتوبوسرانی را با سه هدف کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار و سفر، کمینه‌سازی اندازه ناوگان و کمینه‌سازی هزینه تقاضای تامین نشده و با اعمال محدودیت بر طول مسیرها مدل‌سازی و با الگوریتم ژنتیک حل کردند [Fan, and Machemehl, 2004]. ژائو همین مسئله را با دو هدف کمینه‌سازی تعداد سفر وسایل نقلیه عمومی و بیشینه‌سازی پوشش تقاضا و با لحاظ محدودیت مستقیم بودن مسیرهای اتوبوس‌رانی مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده حل کرد [Zhao, 2006]. پاچکو و همکاران کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار و سفر را به عنوان هدف و تعداد خطوط، اندازه ناوگان و مکان ایستگاه را به عنوان محدودیت‌های مدل خود در نظر گرفته و مدل حاصل را با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه حل کردند [Pacheco, et al. 2009]. سیپریانی و همکاران همین مسئله را با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های اپراتور و مصرف‌کنندگان و با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت اتوبوس، تواتر حرکت و طول مسیر مدل‌سازی و مانند بسیاری دیگر از مقالات پیشین با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند [Cipriani, et al. 2012]. برخی دیگراز پژوهش‌ها نیز با لحاظ پیچیدگی مدل به ویژه در مسایل بزرگ‌مقیاس الگوریتم‌هایی ابتکاری عمدتا مبتنی بر جستجوی حریصانه ارائه داده‌اند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم‌های تولید مسیر و تولید مسیر توسعه‌یافته اشاره کرد [Khanzad, et al. 2018].

مدل ریاضی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه طراحی خطوط ریلی (رو و زیرزمینی) نیز کمابیش مشابه مدل‌های توسعه شبکه اتوبوس‌رانی است. با این تفاوت که در مورد توسعه خطوط ریلی

زیرزمینی الزامی به رعایت دقیق مسیرهای موجود در شبکه معابر روسطحی وجود ندارد. در نمونه‌ای از این دست پژوهش‌ها، کلیسنز و همکاران یک مدل دو هدفه را با اهداف کاهش توام هزینه‌های ثابت و متغیر جابجایی در مسیر و افزایش سطح سرویس به مسافران و با محدودیت‌های ظرفیت حمل مسافر و با در نظر گرفتن تغییر در ناوگان و تعداد واگن هر قطار در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی حل کردند [Claessens, et al. 1998].

بوسیک و همکاران یک الگوریتم ابتکاری برای حل تقریبی این مسئله ارائه کردند [Bussieck, et al. 2004]. شوبل و شول همین مدل را به صورت چند مسیره و با فرض حمل‌ونقل توام کالا و مسافر حل کردند[Schobel and Scholl, 2005] . کانکا و همکاران یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه برای تصمیم گیری در خصوص طراحی شبکه و سرمایه‌گذاری در ناوگان حمل‌ونقل عمومی با هدف کمینه‌سازی هزینه و زمان سفر مسافرین ارائه کردند [Canca, et al. 2016]. این پژوهشگران تقاضای سفر را در مدل حساس به هزینه لحاظ کردند. گوریگک و اشمیت از تابع هدف کاهش توام هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل با محدودیت حد پایین تعداد سفر در روز با دو فرض یکسان بودن وسایل نقلیه و اینکه خطوط حمل و نقل به دو صورت پرسرعت و عادی نسبت به جابجایی مسافران اقدام می‌نمایند، استفاده کردند [Goerigk, and Schmidt, 2017].

برخی دیگر از پژوهشگران نیز مسایل مکان‌یابی ایستگاه‌ها و مسیرهای حمل‌ونقل عمومی را با مسئله زمان‌بندی ناوگان تلفیق و به‌صورت یکپارچه حل کرده‌اند. به عنوان نمونه بارگریو و همکاران مسئله یکپارچه زمان‌بندی استوار ناوگان و مکان‌یابی مسیر سامانه حمل‌ونقل عمومی را با اهداف کمینه‌سازی زمان سفر مسافران و هزینه‌های اپراتور در قالب مسئله‌ای دو مرحله‌ای مدل‌سازی و با یک الگوریتم ابتکاری حل کرده‌اند [Burggraeve, et al. 2017].

جدول ۱. خلاصه ادبیات موضوع

منبع	برنامه‌ریزی کاربری زمین/تخصیص تراکم														برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی										
	توابع هدف/محدودیت‌ها					متغیرهای تصمیم			حوزه تصمیم‌گیری				توابع هدف/محدودیت‌ها									وسیله	
	استفاده از سامانه	پوشش/دسترسی	اختلاط کاربری‌ها	اقتصادی	اجتماعی	زیست‌محیطی	سایر	تراکم	کاربری	تعداد طبقات	ناحیه ایستگاهی	کریدور	منطقه شهری	شهر	زمان انتظار و سفر	ظرفیت/اندازه ناوگان	پوشش تقاضا	تعداد سفر	طول مسیر	مستقیم بودن مسیر	تعداد خطوط	هزینه‌های	تواتر حرکت	آثار زیست‌محیطی	اتوبوس	قطار شهری
[Lin and Gau, 2006]	●				●	●		●	●		●						●								
[Chen, et al., 2012]		●		●		●		●	●			●													
[Li, et al., 2016]	●								●	●	●														
[Ma, et al., 2018]	●						●	●	●	●	●														
[Oh, et al., 2005]	●					●		●					●												
[Lee, and Oh, 2012]						●		●		●		●	●												
[Hsieh, et al., 2017]				●		●			●	●					●		●								
[Fan, and Machemehl, 2004]															●	●	●	●	●		●				●
[Zhao, 2006]																				●				●	
[Pacheco, et al., 2009]																●				●				●	
[Cipriani, et al., 2012]																		●				●		●	
[Khanzad, et al., 2018]															●		●							●	●
[Claessens, et al. 1998]																	●					●			●
[Bussieck, et al., 2004]																						●			●
[Schobel, and Scholl, 2005]																						●			●
[Canca, 2016]																●						●			●
[Goerigk, and Schmidt, 2017]																						●			●
[Burggraeve, et al., 2017]		●														●						●			●
پژوهش حاضر	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

۳. روش تحقیق

۳-۱ تعریف مسئله

همان‌طور که از جدول شماره ۱ پیدا است، مرور ادبیات در دو حوزه برنامه‌ریزی کاربری و حمل‌ونقل شهری بیانگر وجود شکاف‌های زیر است:

- عدم مدل‌سازی «یکپارچه» کاربری زمین و حمل‌ونقل عمومی مدل‌های پیشین یا وجود و مکان دقیق کریدور حمل‌ونقل را مفروض گرفته و براساس آن تراکم/کاربری بهینه را تخصیص داده‌اند و یا با مفروض گرفتن جمعیت و فعالیت نواحی ترافیکی مکان بهینه ایستگاه‌ها/کریدورهای حمل‌ونقل عمومی را تعیین کرده‌اند. در هر دو رویکرد برهم‌کنش برنامه‌های توسعه شهری و حمل‌ونقل عمومی نادیده گرفته و از هم‌افزایی بالقوه این دو جهت دستیابی به توسعه شهری پایدار چشم‌پوشی شده است.
- محدودیت مدل‌های پیشین تخصیص تراکم/کاربری به نواحی مجاور یک ایستگاه و یا حداکثر یک کریدور حمل‌ونقل و عدم توجه به نقش ایستگاه‌ها و نواحی ایستگاهی در مقیاس منطقه و شهر
- عدم مدل‌سازی اختلاط کاربری‌ها به عنوان یکی از مولفه‌های اساسی در توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی و به‌طور کلی توسعه پایدار شهری
- عدم لحاظ محدودیت‌های زیست‌محیطی در مدل‌های برنامه‌ریزی توسعه حمل‌ونقل عمومی

هدف از این پژوهش مدل‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی کاربری زمین و حمل‌ونقل عمومی شهری در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با اهداف چندگانه است. اهداف این مدل ریاضی عبارتند از: ۱) بیشینه‌سازی تراکم سکونت و فعالیت در مجاورت ایستگاه‌ها به منظور افزایش مطلوبیت جایگزینی خودروی شخصی با استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی، ۲) بیشینه‌سازی انطباق نسبت سکونت به فعالیت هر ناحیه با الگوی مطلوب به منظور کاهش نیاز به سفرهای کاری و غیرکاری روزمره از طریق تامین محلی خدمات و مشاغل مورد نیاز ساکنین و ۳) کمینه‌سازی هزینه توسعه سامانه حمل‌ونقل عمومی (مجموع هزینه‌های احداث ایستگاه و خط مترو). محدودیت‌های مدل عبارتند از: ۱) محدودیت حداقل و حداکثر فاصله دو ایستگاه متوالی، ۲) محدودیت حداقل و حداکثر جمعیت و فعالیت تخصیص یافته به هر محله شهری به منظور عدم مغایرت اساسی با طرح فرادست و پایینبندی به نظام تامین خدمات آن، ۳) محدودیت حداکثر تعداد ایستگاه‌ها، ٤) محدودیت الزام اتصال مسیر سامانه حمل‌ونقل عمومی به سامانه موجود و ۵) محدودیت‌های زیست‌محیطی احداث ایستگاه‌ها و خطوط سامانه حمل‌ونقل عمومی. متغیرهای تصمیم مدل نیز عبارتند از کاربری (و تراکم سکونت و فعالیت) تخصیص یافته به هر بلوک و مکان ایستگاه‌ها و اتصالات شبکه حمل‌ونقل عمومی. همچنین مفروضات ذیل در طراحی مدل مدنظر بوده‌اند:

- مناطق مورد برنامه‌ریزی شامل مناطق شهری موجود (دارای جمعیت و فعالیت اولیه) است و شبکه حمل‌ونقل عمومی انبوه‌بر تا حدودی توسعه یافته و توسعه‌های آتی می‌بایست با لحاظ شبکه موجود و در اتصال با آن صورت پذیرد.
- با توجه به الزام تثبیت برخی از کاربری‌ها (مانند فضای سبز و کاربری‌های مشابه) این کاربری‌ها تثبیت شده و مدل امکان تغییر آنها را ندارد.
- به منظور اجتناب از مغایرت اساسی در تخصیص کاربری به بلوک‌ها، حداقل و حداکثر جمعیت محلات طرح جامع رعایت شده است.

۳-۲ مدل ریاضی

با توجه به تعدد اندیس‌ها، مجموعه‌ها پارمترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل و به منظور پرهیز از تطویل متن، نمادهای مورد استفاده در مدل در جدول شماره ۲ فهرست شده‌اند.

جدول ۲. نمادهای مورد استفاده در مدل

اندیس‌ها و مجموعه‌ها	
N	مجموعه محلات $(i = 1. \dots . N)$
B_i	مجموعه بلوک‌های محله iام $(j = 1. \dots . B_i)$
F_i	زیرمجموعه‌ای از مجموعه B_i شامل بلوک‌های با کاربری تثبیت شده هر محله $(j = 1. \dots . F_i)$
K	مجموعه کاربری‌های بالقوه $(k = 1. \dots . K)$
L	مجموعه نقاط بالقوه/بالفعل ایستگاه $(l = 1. \dots . L)$
L'	مجموعه نقاط واقع بر خطوط موجود و محل اتصال بالقوه خط جدید با خطوط موجود $(l = L + 1. \dots . L')$
پارامترها	
A_{ij}	مساحت قابل مداخله قطعه jام محله i
$S_{ij}^{(l)}$	مقدار این پارامتر در صورتی که قطعه jام از محله i در شعاع ۵۰۰ متری ایستگاه حمل‌ونقل عمومی k واقع شده باشد، برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر صفر است.
P_{ij}	جمعیت اولیه بلوک jام از محله i
E_{ij}	اشتغال اولیه بلوک jام از محله iام
α_k	ضریب سکونت در واحد مساحت کاربری kام
β_k	ضریب اشتغال در واحد مساحت کاربری kام
$MinP_i$	حداقل جمعیت قابل قبول محله iام برطبق اسناد فرادست
$MaxP_i$	حداکثر جمعیت قابل قبول محله iام برطبق اسناد فرادست
$MinE_i$	حداقل فعالیت قابل قبول محله iام برطبق اسناد فرادست
$MaxE_i$	حداکثر فعالیت قابل قبول محله iام برطبق اسناد فرادست
$MaxS$	حداکثر تعداد ایستگاه‌ها
$MinD$	حداقل فاصله قابل قبول میان دو ایستگاه متوالی
$MaxD$	حداکثر فاصله قابل قبول میان دو ایستگاه متوالی
JHB^l	نسبت اشتغال و سکونت مطلوب در ناحیه ایستگاهی l
FC_l	هزینه ثابت احداث ایستگاه l
$G_{ll'}$	هزینه احداث خط میان دو ایستگاه l و 'l به ازای هر واحد فاصله میان دو ایستگاه
$D_{ll'}$	فاصله میان دو ایستگاه l و 'l
متغیرهای تصمیم	
x_{ijkl}	متغیر صفر و یک. برابر است با یک اگر به نقطه l ایستگاه تخصیص یابد و کاربری i به بلوک jام از محله i تخصیص یابد و برابر است با صفر در غیر این‌صورت
y_l	متغیر صفر و یک. برابر است با یک اگر در نقطه i ایستگاهی تاسیس شده باشد و برابر است با صفر در غیر این‌صورت.
z_{ll}'	متغیر صفر و یک. برابر است با یک اگر ایستگاه‌های i و 'i در قالب کریدور حمل‌ونقل عمومی به یکدیگر متصل شوند و برابر صفر است در غیر این‌صورت.
u_{ijl}	متغیر صفر و یک. برابر است با یک اگر تقاضای سفر مسکونی بلوک jام از محله iام توسط ایستگاه l تامین شود و صفر است در غیر این‌صورت.
v_{ijl}	متغیر صفر و یک. برابر است با یک اگر تقاضای سفر اشتغال بلوک jام از محله iام توسط ایستگاه l تامین شود و صفر است در غیر این‌صورت.
θ_l	متغیر خطی‌سازی قدرمطلق در تابع هدف دوم
$t_{ll'}$	متغیر خطی‌سازی رابطه کسری در محدودیت

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مدل پیشنهادی دارای سه تابع هدف است. تابع هدف نخست بیشینه‌سازی پوشش حمل‌ونقل عمومی برای جمعیت و فعالیت (متراکم‌سازی) به منظور بیشینه‌سازی استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی است. ω_1 و ω_2 به ترتیب نمایانگر متوسط تولید سفر به ازای هر ساکن و شاغل هستند و به منظور هم‌بعد سازی پوشش جمعیت و فعالیت به مدل افزوده شده‌اند.

$$\max O_1 = \sum_i \sum_j \sum_l \omega_1 u_{ijl} + \omega_2 v_{ijl} \qquad (۱)$$

تابع هدف دوم حفظ تعادل میان سکونت و فعالیت (اختلاط) در هر یک از محلات به منظور کمینه‌سازی نیاز به سفر/کاهش طول سفر و در نتیجه افزایش مطلوبیت نسبی استفاده از مدهای جایگزین سفر است.

$$min\ O_2 = \sum_l \left| \sum_i \sum_j \frac{u_{ijl}}{v_{ijl}} - JHB^l \right|$$
(۲)

تابع هدف سوم کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از توسعه سامانه حمل‌ونقل عمومی است. این هزینه شامل هزینه احداث ایستگاه و هزینه‌های احداث خط است. هزینه‌های احداث خط تابع اختلاف ارتفاع دو ایستگاه و مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی است که مجموعا در قالب ضریبی به مدل افزوده شده است.

$$\min O_3 = \sum_l FC_l y_l + \sum_l \sum_{l'} G_{ll'} D_{ll'} z_{ll'} \qquad (۳)$$

همان‌طور که در بخش تعریف مسئله اشاره شد، مسئله مقید به محدودیت‌هایی به شرح ذیل است. محدودیت‌های (٤) و (٥) روشن می‌کنند که پوشش جمعیت و فعالیت هر بلوک توسط هر ایستگاه بالقوه منوط به احداث ایستگاه در مکان مربوطه است.

$$u_{ijl} \le \mathrm{MS}_{ij}^l y_l \quad \forall i \in N; j \in B_i; l \in L \cup L' \qquad (٤)$$

$$v_{ijl} \le \mathrm{MS}_{ij}^l y_l \quad \forall i \in N; j \in B_i; l \in L \cup L' \qquad (٥)$$

همچنین حداکثر جمعیت و فعالیت تخصیص یافته به هر بلوک محدود به نوع کاربری و مساحت بلوک است که به آن اختصاص می‌یابد. این محدودیت در روابط شماره (٦) و (٧) فرموله شده است.

$$u_{ijl} \le \sum_k \alpha_k A_{ij} x_{ijk} \quad \forall i \in N; j \in B_i; l \in L \cup L' \quad (٦)$$

$$v_{ijl} \le \sum_k \beta_k A_{ij} x_{ijk} \quad \forall i \in N; j \in B_i; l \in L \cup L'$$
(٧)

همچنین روشن است که به هر قطعه تنها یک کاربری تخصیص می‌یابد. این محدودیت در قالب رابطه شماره (٨) به مدل افزوده شده است.

$$\sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N; j \in B_i$$
(٨)

به منظور اجتناب از مغایرت اساسی با طرح شهری فرادست، جمعیت و فعالیت تخصیص یافته به هر محله نباید از حداقل و حداکثر تعریف شده برای آن محله در طرح جامع تخطی کنند. این محدودیت در قالب روابط (٩) و (١٠) فرموله شده است.

$$MinP_i \le \sum_j \sum_k \alpha_k A_{ij} x_{ijk} \le MaxP_i \quad \forall i \in N$$
(٩)

$$MinE_i \le \sum_j \sum_k \beta_k A_{ij} x_{ijk} \le MaxE_i \quad \forall i \in N$$
(١٠)

به منظور تثبیت کاربری بلوک‌های مستلزم تثبیت،جمعیت و فعالیت آنها ثابت و برابر جمعیت و فعالیت وضع موجود در نظر گرفته شده است. این محدودیت‌ها در روابط شماره (١١) و (١٢) آمده است.

$$\alpha_k A_{ij} x_{ijk} = P_{ij} \quad \forall i; k; j \in F_i$$
(١١)

$$\beta_k A_{ij} x_{ijk} = E_{ij} \quad \forall i; k; j \in F_i$$
(١٢)

علاوه بر محدودیت‌های شهرسازی، محدودیت‌هایی نیز در زمینه تعداد و محل ایستگاه‌ها و کریدورها از منظر حمل‌ونقل وجود دارد که در ادامه فهرست شده‌اند. نخستین این محدودیت‌ها که

در قالب رابطه شماره (۱۳) آمده است حداکثر تعداد ایستگاه‌ها را به مقداری از پیش تعیین شده محدود می‌کند.

$$\sum_l y_l \le MaxS \quad (۱۳)$$

محدودیت دیگر فاصله میان دو ایستگاه متوالی است که نباید از حداقل و حداکثر معین تخطی کند. محدودیت حداقل فاصله دو ایستگاه متوالی در رابطه (۱٤) و محدودیت حداکثر فاصله میان آنها در رابطه (۱۵) مدل‌سازی شده است. پارامتر $D_{ll'}$ علاوه بر فاصله دو نقطه بالقوه احداث ایستگاه نمایانگر محدودیت زیست محیطی احداث کریدور میان آنها نیز هست و در صورتی که احداث کریدور میان این دو ایستگاه مستلزم صدمات زیست محیطی باشد، این فاصله بی‌نهایت منظور شده تا امکان تعیین چنین اتصالی از مدل سلب گردد.

$$(y_l + y_{l'} - 1)MinD \le D_{ll'} \quad \forall l.l' \in L.l' \ne l \quad (۱٤)$$

$$z_{ll'} D_{ll'} \le MaxD \forall l.l' \in L.l' \ne l \quad (۱۵)$$

همچنین اتصال میان دو ایستگاه در شرایطی برقرار خواهد شد که هر دو ایستگاه احداث شده باشند. این شرط در قالب روابط (۱٦) و (۱۷) به مدل افزوده شده‌اند.

$$\sum_{l'} z_{ll'} \le x_l \quad \forall l \in L \quad (۱٦)$$

$$\sum_l z_{il} \le x_{l'} \quad \forall l' \in L \quad (۱۷)$$

تمامی ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه‌های آغازین و پایانی می‌بایست دارای تعداد برابری خط ورودی و خروجی باشند. همچنین روابط (۲۱) الی (۲٤) نوع متغیرهای تصمیم مدل را نمایش می‌دهند.

$$\sum_{l'} z_{ll'} - \sum_{l'} z_{l'l} = 0 \quad \forall l \in L \quad (۱۸)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{l' \in L'} z_{l'l} = 1 \quad (۱۹)$$

$$\sum_{l \in L} z_{Ll} - \sum_{l \in L} z_{lL} = -1 \quad (۲۰)$$

$$x_{ijk} \in \{0.1\} \quad \forall i \in N; j \in B_i; k \in K \quad (۲۱)$$

$$y_l \in \{0.1\} \quad \forall l \in L \quad (۲۲)$$

$$z_{ll'} \in \{0.1\} \quad \forall l.l' \in L \quad (۲۳)$$

$$u_{ijl}; v_{ijl} \ge 0 \quad \forall i \in N; j \in B_i; l \in L \quad (۲٤)$$

رابطه شماره (۲) در مدل فوق‌الذکر موجب می‌شود که مدل غیرخطی شود. لذا در ادامه با استفاده از تبدیلات پیشنهادی [Yu, and Li, 2000] این رابطه به روابطی خطی به شرح ذیل تبدیل شده است:

$$\min O_2 = \sum_l \left[\sum_i \sum_j (u_{ijl} - JHB^l v_{ijl}) + 2\theta_l\right] \quad (۲۵)$$

$$\sum_i \sum_j (u_{ijl} - JHB^l v_{ijl}) + \theta_l \ge 0 \quad \forall l \in L \quad (۲٦)$$

۳-۳ روش حل

برای تبدیل مدل به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه از تکنیک نیل آرمان استفاده شده است. در این تکنیک برای هر تابع هدف، یک آرمان در نظر گرفته شده و هدف مدل جدید کمینه‌سازی میزان انحراف از این آرمان‌ها در نظر گرفته می‌شود [Gembicki and Haimes, 1975]. در این رویکرد با تغییر اوزان مربوط به هر یک از توابع هدف، می‌توان مجموعه جواب‌های کارآی پارتویی مسئله چندهدفه اولیه را محاسبه کرد. در مسئله حاضر، آرمان تابع نخست مجموع کل جمعیت و فعالیت قابل تخصیص و آرمان توابع دوم و سوم صفر در نظر گرفته شده است و هدف مدل تک‌هدفه کمینه‌سازی مجموع اختلاف از این آرمان‌ها است.

$$\min \gamma \quad (۲۷)$$

$$S.T.$$

$$O_1 - w_1\gamma \le g_1 \quad (۲۸)$$

$$O_2 - w_2\gamma \le g_2 \quad (۲۹)$$

$$O_3 - w_3\gamma \le g_3 \quad (۳۰)$$

(۲۶) و (۲٤)-(٤)

در روابط فوق w و g به ترتیب نمایانگر بردار اوزان و آرمان‌های توابع هدف هستند و γ متغیر تصمیم نیل به آرمان می‌باشد.

٤-۳. نمونه موردی

منطقه ۲۲ سومین منطقه پهناور کلان‌شهر تهران است. مطابق طرح جامع تهران ظرفیت‌پذیری سکونت در منطقه ۵۰۰ هزار نفر تعیین شده[Boon Sazgan Paydar, 2007] و براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ جمعیت منطقه بالغ بر ۱۷٦ هزار نفر بوده است [Iran Statistical Center, 2017] این منطقه در طول ۲ دهه گذشته با متوسط نرخ رشد جمعیت سالانه ۵,۹ درصد همواره با اختلاف بسیار زیاد با سایر مناطق سریع‌ترین نرخ رشد جمعیت را دارا بوده است [رنجی و همکاران، ۱۳۹۲]. با وجود این، شبکه حمل‌ونقل عمومی انبوه‌بر منطقه با تنها ٤ ایستگاه مترو و پوشش تنها ۳ درصد مساحت، یکی از سه منطقه دارای کمترین پوشش مترو در تهران است. با توجه به آنچه در مورد وضعیت توسعه شتابان و همچنین ضعف حمل‌ونقل عمومی منطقه گفته شد، از یک سو جمعیت وضع موجود و توسعه‌های فعلی منطقه نیازمند توسعه سامانه حمل ونقل عمومی هستند و از سوی دیگر با توجه به در حال توسعه بودن منطقه، هدایت توسعه‌های آتی به مجاورت سامانه حمل ونقل عمومی پیشنهادی امکان‌پذیر است. از این رو منطقه ۲۲ تهران به عنوان نمونه موردی انتخاب و مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های آن پیاده‌سازی گردید. در این راستا، نقشه پهنه‌بندی طرح تفصیلی منطقه ۲۲ مصوب ۱۳۹۲ (در قالب پهنه‌های ٤گانه با کدهای ۳ رقمی که نشان‌دهنده نوع کاربری و تراکم آن‌ها می‌باشند)، از شهرداری تهران اخذ شده و مورد تحلیل قرار گرفت (تصویر ۱). از همین رو، در فرایند حل مدل ریاضی پیشنهادی در منطقه ۲۲، دو نکته مورد توجه قرار گرفته است:

- با توجه به اینکه نظام کاربری زمین در طرح تفصیلی منطقه ۲۲، بر مبنای «پهنه‌های ٤ گانه (سکونت (R)، فعالیت (S)، مختلط (M)، و حفاظت (G) با کدهای ۳ رقمی می‌باشد که نشانگر فعالیت‌ها و تراکم‌های مختلف است» است، در تخصیص کاربری زمین و تراکم به بلوک‌های آماری، از پهنه‌های ۳ کدی فوق‌الذکر استفاده شده است.
- همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد، برخی پهنه‌های طرح تفصیلی در مدل «تثبیت» شده در نظر گرفته شده‌اند زیرا امکان تغییر در کاربری و تراکم آن‌ها وجود ندارد. این پهنه‌ها شامل ورزشگاه آزادی، بوستان چیتگر و خرگوش‌دره، باغ گیاه‌شناسی، دریاچه شهدای خلیج فارس، پژوهشکده‌ها و دانشگاه‌ها، کاربری‌های خدماتی از جمله مدارس و غیره و برخی ساخت‌وسازهای غیرقابل تغییر است.

٤. یافته‌ها

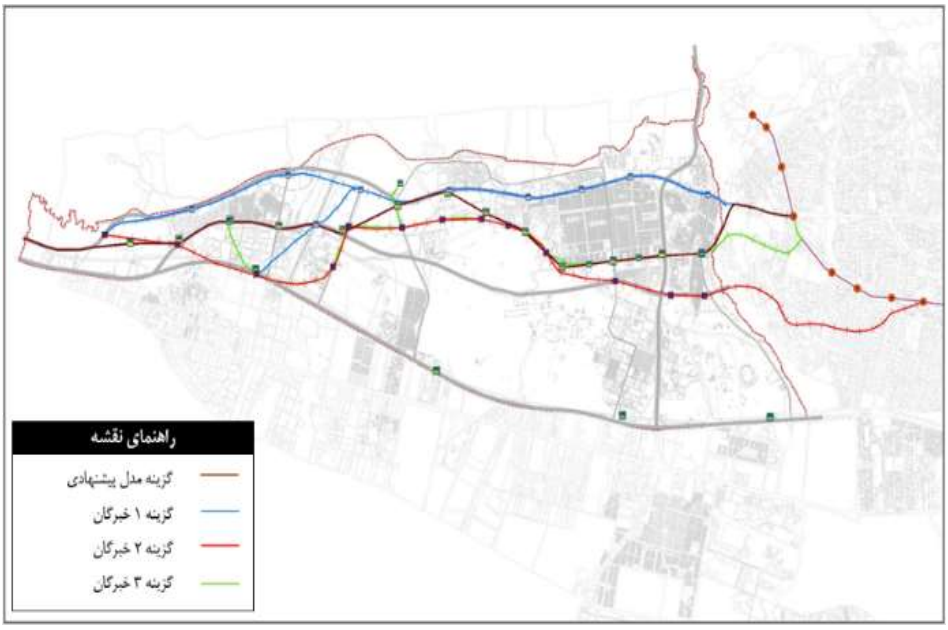
نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در نمونه موردی (منطقه ۲۲ تهران) در جدول ۲ و تصویر ۲ آمده است. گزینه حاضر از میان مجموعه جواب‌های پارتویی که با تغییر پارامترهای مدل نیل به آرمان به دست آمده است، به عنوان بهترین پاسخ با توجه به نظرات خبرگان انتخاب شده است. همان‌طور که از نقشه و جدول پیدا است، سامانه حمل‌ونقل عمومی با پوشش تنها ۲۳ درصد مساحت منطقه، به ترتیب حدودا ٦۹ و ٦۱ درصد فعالیت و جمعیت منطقه را پوشش می‌دهد و شاخص اختلاط کاربری نیز برابر ۸,۵ است. به عبارت دیگر متوسط اختلاف اختلاط از اختلاط بهینه در هر ایستگاه ۰,٦۵ است. این در حالی است که بخش قابل توجهی از مساحت منطقه در پهنه سبز و در نتیجه تثبیت شده است. بنابراین مدل امکان تغییر کاربری و تخصیص جمعیت و فعالیت به این پهنه‌ها که در مجاورت ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی موجود نیز واقع شده‌اند نداشته است.

شکل ۱. طرح تفصیلی منطقه ۲۲ و پوشش کنونی مترو در آن

جدول ۳. نتایج پیاده‌سازی مدل در نمونه موردی

نسبت پوشش مترو به مساحت منطقه (درصد)	نسبت جمعیت تحت پوشش به کل جمعیت (درصد)	نسبت فعالیت تحت پوشش به کل فعالیت (درصد)	هزینه تخمینی پیاده‌سازی کریدور پیشنهادی (میلیارد ریال)	اختلاط کاربری
۲۳	٦۰/۷	٦۹/۱	۲۲۰۰۰[1]	۸,۵

شکل ۲. نتایج پیاده‌سازی مدل در نمونه موردی



تصویر ۳. مقایسه گزینه انتخابی مدل با گزینه‌های خبرگان

۵. تحلیل نتایج و بحث

به منظور ارزیابی نتایج مدل پیشنهادی، نتایج با گزینه‌های پیشنهادی خبرگان مقایسه شده است و سپس تغییرات مقادیر توابع هدف نسبت به یکدیگر در جواب‌های کارآی پارتویی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

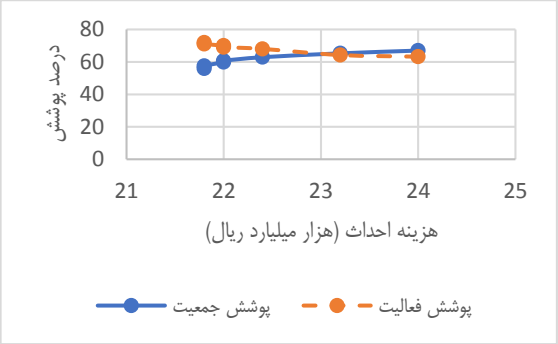
تصویر ۳ و جدول ٤ نتایج مدل را در مقایسه با گزینه‌های پیشنهادی خبرگان نمایش می‌دهند. لازم به ذکر است که برای محاسبه پوشش و اختلاط در گزینه‌های خبرگان از وضع موجود و پهنه‌بندی طرح تفصیلی موجود منطقه استفاده شده است. همان طور که از جدول پیدا است، گزینه مدل قیمت رقابتی (قیمت پایین‌تر نسبت به دو گزینه و بالاتر از یک گزینه خبرگان) در شاخص‌های پوشش جمعیت و فعالیت و اختلاط کاربری‌ها از هر سه گزینه خبرگان بالاتر است. این امر نشان‌دهنده مزیت برنامه‌ریزی یکپارچه کاربری و حمل‌ونقل نسبت به روش‌های پیشین که یکی از دو حوزه حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی کاربری را تابع دیگری در نظر گرفته و برنامه‌ریزی کاربری/حمل‌ونقل را براین اساس انجام می‌دادند است.

جدول ٤. مقایسه گزینه انتخابی مدل با گزینه‌های خبرگان

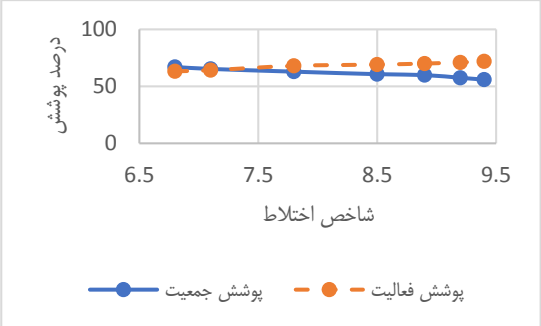
گزینه‌ها	هزینه	پوشش جمعیت	پوشش فعالیت	اختلاط کاربری
گزینه مدل	۲۲۰۰۰	٦۰,۷	٦۹,۱	۸,۵
گزینه ۱ خبرگان	۲۲۱۰۰	٤۸,۵	۵۲,۵	۱۰,۱
گزینه ۲ خبرگان	۲۳۳۰۰	۵٤	٦٤,۸	۹,۸
گزینه ۳ خبرگان	۱۹۰۰۰	۵۹,۸	۵٤,٦	۸,۵

تصاویر ٤ الی ٦ نمایانگرتغییرات دوبه‌دوی مقادیر توابع هدف در چواب‌های بهینه پارتویی هستند. همان‌طور که از نمودار تصویر ٤ پیدا است، هزینه احداث با پوشش جمعیت نسبت مستقیم و با پوشش فعالیت نسبت عکس دارد. دلیل این امر پراکندگی بیشتر واحدهای مسکونی موجود است که پوشش آنها را ملزم به افزایش طول خط حمل‌ونقل عمومی می‌کند. بنابر نمودار تصویر ۵ شاخص اختلاط با پوشش جمعیت نسبت عکس و با پوشش فعالیت نسبت مستقیم دارد. این امر به دلیل

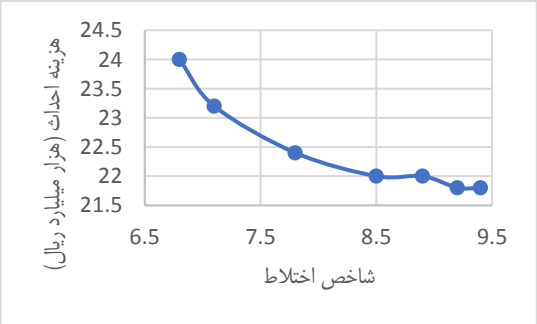
ضریب بالاتر پوشش جمعیت در تابع هدف پوشش (به دلیل ضریب تولید سفر بیشتر فعالیت نسبت به واحدهای مسکونی) است. بنابراین تابع هدف پوشش در درجه اول به دنبال بیشینه سازی پوشش فعالیت‌ها (تخصیص بیشتر فعالیت به نواحی ایستگاهی) است در حالی که تابع هدف اختلاط گرایش به ایجاد توازن میان پوشش جمعیت و فعالیت دارد. ششمین تصویر نیز تغییرات شاخص اختلاط و هزینه احداث نسبت به یکدیگر را نمایش می‌دهد. براین اساس بهبود اختلاط (کاهش مقدار شاخص اختلاط) مستلزم افزایش هزینه به منظور افزایش طول خط و تعداد ایستگاه‌ها است.



تصویر ٤. تغییرات هزینه نسبت به تغییرات پوشش



تصویر ٥. تغییرات اختلاط نسبت به تغییرات پوشش



تصویر ٦. تغییرات اختلاط نسبت به هزینه

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی

در این پژوهش، براساس اصول توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی، مسایل تخصیص کاربری اراضی و تراکم شهری و طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی و حل شده‌اند. مدل حاصل دارای اهداف چندگانه (شامل بیشینه‌سازی تراکم حول ایستگاه‌ها، بهینه‌سازی اختلاط کاربری‌ها و کمینه‌سازی هزینه‌های توسعه شبکه حمل‌ونقل عمومی)، غیر خطی و دارای متغیرهای صحیح است که موجب پیچیدگی محاسباتی مدل می‌شوند. از این رو با استفاده از تکنیک نیل به آرمان و همچنین به‌کارگیری مجموعه‌ای از تبدیلات ریاضی مدل به یک مدل بهینه‌سازی خطی تک هدفه با متغیرهای صحیح تبدیل شده است. مدل نهایی در یک نمونه‌ای موردی در منطقه ۲۲ تهران پیاده‌سازی و حل شده است. نتایج حاکی از پوشش بخش قابل توجهی از تراکم سکونت و فعالیت توسط ایستگاه‌های کریدور حمل‌ونقل عمومی با افزایشی نه چندان قابل توجه در هزینه‌های پیاده‌سازی است. به بیان دیگر مدل پیشنهادی امکان تولید طیفی از جواب‌های کارآی پارتویی با ضرایب اولویت متفاوت برای سه تابع هدف فوق را دارا است. از میان این مجموعه که مرز پارتویی خوانده می‌شود یک جواب توسط خبرگان شهرسازی انتخاب و در قالب نقشه اراده شده است و سایر پاسخ‌های بهینه در قالب نمودارهایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. گزینه بهینه انتخابی مقادیر پوشش جمعیت و فعالیت را به ترتیب ۱۲,۲ و ۲۰,٦ درصد و مقدار شاخص اختلاط کاربری را ۱۰,۲ درصد نسبت به گزینه‌های خبرگان بهبود می دهد. این در حالی است که این گزینه از منظر هزینه نیز با گزینه های خبرگان رقابت‌پذیر است و احداث آن از ۲ گزینه هزینه‌ای کمتر و تنها از یک گزینه هزینه‌ای بیشتر دارد. مدل پیشنهادی از جنبه‌های گوناگون قابلیت بسط و توسعه دارد. نخستین توسعه بالقوه امکان لحاظ بیش از یک مد حمل‌ونقل عمومی و همچنین یکپارچه‌سازی مسئله با مسئله طراحی شبکه معابر است. همچنین بسیاری از پارامترهای مدل شامل جمعیت و فعالیت تخصیص

معادل هر کاربری ماهیاتا غیرقطعی بوده و لحاظ این عدم قطعیت در مدل‌سازی (از جمله از طریق بهینه‌سازی استوار) می‌تواند به بهبود تحقق‌پذیری نتایج کمک کند.

۷. پی نوشت‌ها

۱. هزینه تمام شده گزینه‌ها براساس برآورد کارشناسان معاونت‌های حمل‌ونقل و ترافیک و فنی و عمرانی شهرداری تهران از هزینه های احداث مترو (۲۰۰۰ میلیارد ریال به ازای هر کیلومتر خط مترو) در زیر زمین و در اراضی با شیب و شرایط معمول بوده است. این برآورد مربوط به زمان آغاز نگارش پژوهش (دی‌ماه ۱۳۹۶) است و با توجه به تغییرات نرخ ارز ممکن است تا زمان انتشار تغییراتی کرده باشد.

۸. مراجع

-Bernick, M. and Cervero, R. (1997) "Transit Villages in the 21st Century", New York: McGraw-Hill.

-Bertolini, L., Curtis, C. and Renne, J.L. (2009) "Introduction, in Transit Oriented Development: Making It Happen", Surrey: Ashgate.

-Burggraeve, S., Bull, S., Vansteenwegen, P., and Luspy, R., (2017) "Integrating robust timetabling in line plan optimization for railway systems", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 77, pp. 134-160.

-Bussieck, M., Lindner, T., and Lübbecke, M., (2004) "A fast algorithm for near cost optimal line plans", Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 59, No. 2, pp. 205-220.

-Canca, D., De-Los-Santos, A., Laporte G., and Mesa, J. (2016) "A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model", Annals of Operations Research, Vol. 246, No. 1-2, pp. 127-144.

-Chen, M., Huang, Z., and Zhang, M. (2012) "A GIS Based Model for Land Use and Transit-Integrated Corridor", 12th International Conference of Transportation Professionals, Beijing: 3-6 August 2012.

-Cipriani, E., Gori, S., and Petrelli, M. (2012) "Transit network design: a procedure and an application to a large urban area", Transportation Research Part C, Vol. 20, No. 1, 2-14.

-Claessens, M.T., Van Dijk, N.M., and Zwaneweld, P.J. (1998) "Cost optimal allocation of rail passenger lines", European Journal of Operational Research, Vol. 110, No. 3, 474-489.

-Dantzig, G., Harvey, R., Lansdowne, Z., Robinson D., and Maier, S. (1979) "Formulating and solving the network design problem by decomposition", Transportation Research Part B, Vol. 13, No. 1, pp. 5-17.

-Fan, W. and Machemehl, R. (2004) "Optimal transit route network design problem: algorithms, implementations, and numerical results", Center for Transportation Research, University of Texas, Austin.

-Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. and Rashidi, H. (2013) "A review of urban transportation network design problems", European Journal of Operational Research, Vol. 229, No. 2, pp. 281-302.

-Gembicki, F. and Haimes, Y. (1975) "Approach to performance and sensitivity multiobjective optimization: The goal attainment method", IEEE Transactions on Automatic control, Vol. 20, No. 6, pp. 769-771.

-Goerigk, M. and Schmidt, M. (2017) "Line planning with user-optimal route choice", European Journal of Operational Research, Vol. 259, No. 2, pp. 424-436.

-Grant, J. and Tsenkova, S. (2012) "New Urbanism and Smart Growth Movements",

International Encyclopedia of Housing and Home, San Diego: Elsevier, pp. 120-126.

-Hsieh, S., Schuler, N., Shi, Z., Fonseca, J., Merechal F. and Schlueter, A. (2017) "Defining density and land uses under energy performance targets at the early stage of urban planning processes", Energy Procedia, Vol. 122, pp. 301-306.

-Khanzad, I., Seyedabrishami, S., Nazemi, M. and Zarrinmehr, A. (2018) "Transit Network Design Problem: An Expansion of the Route Generation Algorithm", Advanced Concepts, Methodologies and Technologies for Transportation and Logistics, Vol. 572, Cham: Springer.

-Lee, D. and Oh, K. (2012) "A development Density Allocation Model Based on Environmental Carrying Capacity", International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 3, No. 5, pp. 486-490.

-Li, J., Guo X., and Hu, T. (2016) "Station Planning Model of a Transit Vllage around a Subway", COTA International Conference of Transportation Professionals, Shanghai: 6-9 July, 2016.

-Lin, J. and Gau, C. (2006) "A TOD Planning Model to Review the Regulation of Allowable Development Densties around Subway Stations", Land Use Policy, Vol. 23, No. 3, pp. 353-360.

-Ma, X., Chen, X., Li, X., Ding, C., and Wang, Y. (2018) "Sustainable station-level planning: An integrated transport and land use design model for transit-oriented development", Journal of Cleaner Production, Vol. 170, pp. 1052-1063.

-Oh, K., Jeong, Y., Lee, D., Lee, W., and Choi, J. (2005) "Determining Development Density Using the Urban Carrying Capacity Assessment System", Landscape and Urban Planning, Vol. 73, No. 1, pp. 1-15.

-Pacheco, J., Alvarez, A., Casado, S., and González-Velarde, J. (2009) "A tabu search approach to an urban transport problem in northern Spain", Computers and Operations Research, Vol. 36, No. 3, pp. 967–979.

-Schöbel, A. and Scholl, S. (2005) "Line planning with minimal traveling time", ATMOS 2005-5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, Wadern: 7 October 2005.

-Steenbrink, P. (1974) "Transport network optimization in the Dutch integral transportation study", Transportation Research, Vol. 8, No. 1, pp. 11-27.

-Waddell, P. (2011) "Integrated land use and transportation planning and modelling: addressing challenges in research and practice", Transport Reviews, Vol. 31, No. 2, pp. 209-229.

-Yu, C. and Li, H. (2000) "A robust optimization model for stochastic logistic problems", International Journal of Production Economics, Vol. 64, No. 1-3, pp. 385–397.

-Zhao, F. (2006) "Large-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers", Journal of Public Transportation, Vol. 9, No. 9, pp. 107-129.

-بوم‌سازگان پایدار (۱۳۸٦) "طرح جامع شهر تهران: خلاصه گزارش"، وزارت راه و شهرسازی: تهران.

-رنجی، ح.، عرفانی، ج.، حق‌گو، ن. و قیومی، ز. (۱۳۹۲) "بررسی ویژگی‌های جمعیت و مسکن در مناطق ۲۲گانه شهر تهران در سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۰ و مقایسه آن با سال ۱۳۸۵"، پژوهشکده آمار: تهران.

-قریب، فریدون (۱۳۹٤) "شبکه ارتباطی در طراحی شهری"، انتشارات دانشگاه تهران: تهران.

-مرکز آمار ایران (۱۳۹٦) "نتایج تفصیلی سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵"، مرکز آمار ایران: تهران.

Integrated Land-Use Allocation and Transit Network Design Problem -Case Study: Tehran's 22nd Region

B. Aminzadeh Gohari (Corresponding author), Associate Professor, Faculty of Architecture and Urabn Development, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

A. Jabbarzadeh, Assitant Professor, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

S. Rastegar, PhD Candidate, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

M. Rahmani, PhD Candidate, School of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran

B. Aminzadeh-Goharrizi, Ph.D. Candidate, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

E-mail: bahram.aminzadeh@gmail.com

Abstract

Due to interactions between land-use and transportation and potential synergies of integrated urban land-use and transit planning, in this paper an integrated land-use allocation and transit network design problem is modelled as a multi-objective optimization problem. The objectives of the model include maximizing population and activity coverage of the transit corridor, optimizing land-use diversity and minimizing total costs of transit corridor implementation. Decision variables include land-use and density allocated to each block and the location of the stations and links of the transit corridor. Furthermore, several constraints for environmental issues and maximum allowable population and activity for each neighbourhood have also been incorporated into the model. The resultant multi-objective mixed integer non-linear model is transformed into a single objective mixed integer linear programming model using goal attainment approach and a number of linearization techniques. The resultant approach is applied to a real case study in Tehran's 22nd region and the results are analysed. The results show that the proposed model on average improves population coverage by 12.2 percent, activity coverage by 20.6 percent and land-use diversity by 10.2 percent while mainaing its cost competitiveness (with an average 2.5 percent increase in total costs).

Keywords: Land-use planning, transit planning, sustainable urban planning, Transit Oriented Development (TOD), Multi-Objective Optimization (MOP).

بهرام امین‌زاده گوهرریزی، آرمین جبارزاده، سعید رستگار، مهرداد رحمانی، بابک امین‌زاده گوهرریزی

بهرام امین‌زاده گوهرریزی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی راه و ساختمان را در سال ۱۳۵۵ از دانشگاه پلی‌تکنیک تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته شهرسازی در سال ۱۳٦۷ را از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته شهرسازی از دانشگاه تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان توسعه پایدار شهری و توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین است.

آرمین جبارزاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم‌وصنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۸۷ را از دانشگاه علم‌وصنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم‌وصنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی ریاضی و بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت و مدلسازی و بهینه‌سازی شبکه‌های زنجیره تامین، لجستیک و حمل‌ونقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم‌وصنعت ایران است.

مهرداد رحمانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی شهرسازی را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین و درجه کارشناسی ارشد در رشته شهرسازی با گرایش برنامه‌ریزی شهری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه تهران اخذ نمود. وی از سال ۱۳۹۳ در مقطع دکتری رشته شهرسازی در دانشگاه تهران مشغول به تحصیل است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی بوده و در حال حاضر مدرس دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین است.

سعید رستگار، درجه کارشناسی در رشته مهندسی نرم‌افزار را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اسلامی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۳ را از سازمان مدیریت صنعتی اخذ نمود. وی از سال ۱۳۹٤ در مقطع دکتری رشته مهندسی صنایع در دانشگاه علم‌وصنعت ایران مشغول به تحصیل است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی، حمل‌ونقل و سیستم‌های شهری بوده است.

بابک امین‌زاده گوهرریزی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه علم‌وصنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از سازمان مدیریت صنعتی اخذ نمود. وی از سال ۱۳۹۵ در مقطع دکتری رشته مهندسی صنایع در دانشگاه علم‌وصنعت ایران مشغول به تحصیل است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کاربرد مدل‌سازی ریاضی، بهینه‌سازی و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسایل شهری به‌ویژه کاربرد بوده است.