مدل پیشنهادی تراکم سکونت و توزیع فعالیت برای انطباق با اصول TOD

مطالعه موردی: منطقه ۲۱ شهر تهران[1]

مهرداد رحمانی[2] - دانشجوی دکتری، دانشکده شهرسازی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
سعید رستگار - دانشجوی دکتری صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، مدیریت سیستم و بهره‌وری، دانشکده صنایع دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران.
بهرام امین‌زاده گوهرریزی - دانشیار شهرسازی، دانشکده شهرسازی و معماری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
شیوا نوری - کارشناس‌ارشد شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
بابک امین‌زاده گوهرریزی - دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۷

چکیده:
تعیین تراکم و اختلاط کاربری در طرح‌های توسعه شهری همواره از موضوعات مناقشه برانگیز بوده و دیدگاه‌های گوناگونی در این رابطه مطرح بوده است. با این حال این تفاوت رویکردها عمدتاً در بعد نظری باقی مانده و در رابطه با روش‌شناسی آن مطالعات چندانی انجام نشده است. یکی از رویکردهای نوین برنامه‌ریزی شهری به منظور تعیین تراکم و اختلاط کاربری، توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور (TOD) است. مقاله حاضر به دنبال پیشنهاد مدلی برای تعیین تراکم و اختلاط کاربری متناسب با این رویکرد است. توسعه حمل‌ونقل عمومی محور را عموماً مشتمل بر سه بعد طراحی، تراکم و تنوع (اختلاط) کاربری‌ها دانسته‌اند. در این پژوهش دو بعد تخصیص بهینه تراکم و تنوع (اختلاط) کاربری‌ها در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با اهداف چندگانه مدل‌سازی شده است. در این مدل هدف نخست بیشینه‌سازی تراکم در مجاورت ایستگاه‌ها و هدف دوم کمینه‌سازی اختلاف نسبت شغل به سکونت از الگوی ایده‌آل (نسبت شاغلان ساکن به تعداد واحد مسکونی) در هر محدوده TOD است. مجموعه‌ای از محدودیت‌ها از جمله محدودیت‌های سقف جمعیت و فعالیت قابل تخصیص به منظور عدم مغایرت اساسی با طرح‌های فرادست نیز به مدل افزوده شده‌اند. مدل غیرخطی به دست آمده با استفاده از تبدیلاتی به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی با اهداف چندگانه و سپس با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی تک هدفه تبدیل گردیده است. در نهایت مدل پیشنهادی در نمونه موردی منطقه ۱۲ کلانشهر تهران پیاده‌سازی و نتایج به‌دست آمده به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با اجرای مدل، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه پارتویی برای مسئله استخراج گردید. این پاسخ‌ها نقش گزینه‌های پیشِ روی مجموعه مدیریت شهری را ایفا می‌کنند و به تصمیم‌سازان و سیاست‌گذاران شهری امکان می‌دهند تا بنا بر اولویت‌ها، محدودیت‌ها و مقتضیات زمانی و مکانی هر یک از اهداف اختلاط و تراکم، گزینه بهینه را انتخاب کنند. این مدل و نتایج حاصل از آن میتواند مبنای تهیه طرحهای توسعه شهری آینده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی شهری، توسعه حمل‌ونقل عمومی محور، تناسب شغل و واحد مسکونی، تخصیص تراکم، برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه‌سازی با اهداف چندگانه، روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته.

۱ این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان «بررسی و ارزیابی ضوابط شهرسازی شهر تهران برمبنای اصول TOD و ارائه پیشنهادات اصلاحی (بررسی پایلوت در مناطق ۱۲ و ۲۲)» به سفارش مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران می‌باشد.

۱ نویسنده مسئول مقاله: rahmani13@ut.ac.ir

۱. مقدمه

توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور از جمله رویکردهایی است که در دهه‌های اخیر و در کنار رویکردهایی چون رشد هوشمند و نوشهرگرایی به منظور توسعه پایدار شهری پیشنهاد و از سوی سیاست‌گذاران و تصمیم‌سازان شهری مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به معضلات و مشکلات عمده پیشِ روی کلانشهرهای کشور به‌ویژه تهران، از جمله آلودگی هوا و ترافیک به‌نظر می‌رسد اتخاذ این رویکرد با هدف کاهش استفاده از خودروی شخصی در سفرهای روزمره کاری و غیرکاری و جایگزینی آن با طرق دیگر سفر (استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی، پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری) می‌تواند در حرکت به سمت پایداری مؤثر باشد. تعاریف متعددی برای توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور ارائه شده است که از جمله جامع‌ترین آنها می‌توان به تعریف برنیک و سرورو اشاره کرد. این پژوهشگران توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور را «یک باهمستان فشرده با کاربری‌های مختلط به مرکزیت یک ایستگاه حمل‌ونقل عمومی که از طریق طراحی، ساکنان و شاغلان را به کاهش استفاده از اتومبیل و استفاده از طرق دیگر حمل‌ونقل (حمل‌ونقل عمومی، پیاده و دوچرخه) ترغیب می‌کند» تعریف کرده‌اند (Bernick and Cervero, 1997).

به طور کلی توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور در بعد حمل‌ونقل دارای سه هدف عمده است: ۱) کاهش تعداد سفرهای صورت گرفته با وسایل نقلیه موتوری، ۲) افزایش سهم طرق دیگر حمل‌ونقل (پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری) از کل سفرها و ۳) کاهش طول سفرهای موتوری و افزایش سطح اشغال وسیله نقلیه (تشویق سفرهای کوتاه‌تر و افزایش سفر با وسایل حمل‌ونقل عمومی و استفاده اشتراکی از خودرو[1]) (Cervero and Kockelman, 1997). پیگیری این اهداف در الگوی TOD از طریق افزایش تراکم و اختلاط جمعیت و فعالیت در پیرامون ایستگاه حمل‌ونقل عمومی و بهبود کیفیت‌های طراحانه محیط برای پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری صورت می‌پذیرد. از همین رو سرورو و کاکلمن ابعاد TOD را در سه دسته تراکم[2]، تنوع[3] و طراحی[4] طبقه‌بندی کرده‌اند (Cervero and Kockelman, 1997). در ادامه پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص ارزیابی اثرات دو بعد تراکم و اختلاط (موضوع مقاله) بر اهداف فوق و همچنین رویکردهای اتخاذ شده در راستای بهبود هر یک به تفکیک معرفی شده‌اند.

پژوهش‌های گوناگون نمایانگر اثر منفی قابل توجه افزایش تراکم در اطراف ایستگاه‌های مترو بر نرخ مالکیت خودرو، مسافت طی شده با خودروی شخصی و سهم خودروی شخصی در سفرهای روزمره شهروندان است. به‌عنوان مثال مطالعه‌ای بر داده‌های مربوط به تراکم و سفر در ۲۰ شهر بزرگ ایالات متحده آمریکا نشان داد که کشش مسافت طی شده با خودروی شخصی نسبت به افزایش تراکم ۰٫۵۸- است. به عبارت دیگر بنا بر یافته‌های این پژوهش افزایش ۱۰ درصدی در تراکم یک منطقه موجب کاهشی ۵٫۸ درصدی در مسافت طی شده با خودروی شخصی می‌گردد (Manville and Shoup, 2005). این اثر به‌ویژه در صورت دسترس‌پذیری سامانه حمل‌ونقل عمومی با کیفیت و همچنین در صورت اختلاط مناسب کاربری‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Litman, 2015). از این رو اکثر پژوهشگران بر نقش تراکم توسعه به عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی تشکیل دهنده توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور تأکید دارند. با این وجود مطالعات اندکی در راستای محاسبه تراکم بهینه توسعه در نواحی مجاور ایستگاه‌ها صورت گرفته است. لین و گائو در یکی از این معدود مطالعات، مسئله تخصیص تراکم در نواحی ایستگاهی را در قالب یک مسئله چندهدفه با اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مدل‌سازی و حل کردند. در این مدل تابع هدف اقتصادی، بیشینه‌سازی تولید سفر با سامانه ریلی، تابع هدف اجتماعی، کمینه‌سازی اختلاف تراکم و خدمات موجود میان نواحی ایستگاهی و غیرایستگاهی، تابع هدف زیست‌محیطی، بیشینه‌سازی نسبت خدمات به زیربنای تجاری و مسکونی و متغیرهای تصمیم، تراکم مسکونی و تجاری تخصیص یافته در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت‌های مدل پیشنهادی این پژوهشگران نیز عبارتند از حدود بالا و پایین هر کاربری بر مبنای ضوابط موجود و حداکثر ظرفیت توجیه‌پذیر، نسبت کاربری‌های مختلف بر مبنای الزامات قانونی و حداقل سطح سرویس تسهیلات الزامی نسبت به تراکم تخصیص یافته (Lin and Gau, 2006). چن و همکارانش نیز یک مدل تخصیص بهینه تراکم سکونت و اشتغال را به منظور بهینه‌سازی تراکم در کریدورهای حمل‌ونقل عمومی ارائه کردند. اهداف این مدل عبارتند از دسترس‌پذیری، مزایای اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و استفاده از حمل‌ونقل عمومی. این پژوهشگران با استفاده از روش TOPSIS اهداف فوق را ترکیب و مدل نهایی را در قالب یک مسئله بهینه‌سازی خطی تک هدفه مدل‌سازی کردند (Chen et al., 2012).

برس با اشاره به اثرات متغیرهایی چون پراکنش و تراکم توسعه‌های مسکونی و شبکه معابر محلی بر دسترس‌پذیری ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، مفهومی جایگزین برای شعاع دسترسی‌پذیری ایستگاه ارائه می‌کند (Bres, 2014). برای این منظور نواحی مجاور ایستگاه‌ها بر مبنای زمان و وسیله سفر (پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری و استفاده از اتوبوس) به چهار بخش تقسیم می‌شود. بر این مبنا در رویکردی دو مرحله‌ای ابتدا با اصلاح شبکه معابر محلی مجاور ایستگاه حوزه نفوذ (دسترس‌پذیری) واقعی آن افزایش می‌یابد و سپس به صورت توأمان تراکم توسعه و فضاهای باز و عمومی در هر یک از این مناطق به نسبت معیارهای دسترس‌پذیری و تراکم وضع موجود افزایش می‌یابد. لی و همکاران تراکم و پهنه‌بندی یک ناحیه ایستگاهی (دهکده حمل‌ونقل عمومی) را با بیشینه‌سازی استفاده از سامانه حمل‌ونقل ریلی بهینه‌سازی کردند. پهنه‌های قابل تخصیص در این مدل بر مبنای ضوابط و مقررات کشور چین تنها شامل سه نوع تجاری، مسکونی و عمومی می‌شود. تعیین تراکم بهینه هر بلوک در این مدل از طریق تعیین کد پهنه‌بندی

1 Car-sharing
2 Density
3 Diversity
4 Design

مربوطه از میان چهار نوع پهنه مسکونی، دو نوع تجاری و سه نوع پهنه عمومی صورت می‌پذیرد (Li et al., 2016). 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 پیشنهادی این پژوهشگران عبارتند از استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی، فشردگی کاربری‌ها، درجه تعارض کاربری‌ها، دسترس‌پذیری و اثرات زیست‌محیطی و متغیرهای تصمیم مدل نیز انتخاب نوع کاربری و تراکم تخصیص یافته به هر گرید را شامل می‌شوند. در این مدل توجهی به اثر مثبت اختلاط کاربری‌ها نشده است و مقیاس تصمیم‌گیری نیز خرد و شامل تنها یک ناحیه ایستگاهی بدون توجه به ارتباطات آن با سایر نقاط شهر است (Ma et al., 2018).

تنوع (اختلاط) کاربری‌ها از جمله دیگر عواملی است که از طریق کاهش متوسط فاصله میان محل زندگی و مقصدهای کاری و غیرکاری شهروندان علاوه بر کاهش سرانه مسافت طی شده با خودرو، به تغییر شیوه سفر و جایگزینی استفاده از خودروی شخصی با پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری و استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی کمک می‌کند (Litman, 2015). شاخص‌های متعددی برای ارزیابی میزان تنوع (اختلاط) کاربری‌ها پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به شاخص‌های آنتروپی[1]، عدم تشابه[2] و تناسب میان مشاغل و واحدهای مسکونی[3] اشاره کرد. نسبت بهینه میان مشاغل و واحدهای مسکونی تابع مجموعه‌ای از عوامل اقتصادی و اجتماعی است اما مطالعات گوناگون نشان داده‌اند که با نزدیک شدن این نسبت به ۱ سرانه مسافت سفرهای کاری شهروندان کاهش می‌یابد (Kuzmyak et al., 2003). در نمونه‌ای دیگر اسپیرز و همکارانش با مرور و تحلیل پژوهش‌های پیشین دریافتند که کشش سفر با خودروی شخصی نسبت به اختلاط کاربری بین ۰٫۰۲- تا ۰٫۱۱- است (Spears et al., 2010). به عبارت دیگر افزایش ۱۰ درصدی در یکی از شاخص‌های آنتروپی یا عدم تشابه منجر به کاهش ۰٫۲ الی ۱٫۱ درصدی در متوسط مسافت طی شده با خودروی شخصی می‌گردد . وانگ و همکارانش نیز با بررسی رفتار سفر نمونه‌ای متشکل از بیش از پانزده هزار خانوار آمریکایی دریافتند که مسافت طی شده با خودروی شخصی و انتشار آلاینده‌های ناشی از آن در محلاتی با اختلاط مناسب کاربری‌ها و اتصالات کافی در شبکه معابر به طور متوسط نُه درصد از محلات مشابه پایین‌تر است (Wang et al., 2013).

مطالعات پیشین در زمینه تخصیص کاربری عمدتاً در مقیاس خرد و بدون در نظر گرفتن اهداف کلان‌نگر بوده است. از جمله معدود استثنائات موجود در ادبیات که به مسئله تخصیص کاربری (بدون توجه به تخصیص تراکم) در سطح کلان پرداخته‌اند، می‌توان به وارد و همکاران و هسیه و همکاران اشاره کرد. وارد و همکارانش در فرآیندی دو مرحله‌ای ابتدا در قالب یک مدل بهینه‌سازی ریاضی پهنه‌بندی شامل پهنه‌های روستایی، شهری، تجاری، صنعتی، ویژه و فضای باز (سرگرمی) را تعیین و سپس با استفاده از شبیه‌سازی اتوماتای سلولی ریخت‌شناسی توزیع جمعیت در این مناطق را برآورد کردند. توابع هدف مدل پهنه‌بندی پیشنهادی این پژوهشگران نیز شامل کمینه‌سازی انحراف از اهداف پهنه‌بندی و کمینه‌سازی مداخله در نواحی طبیعی بود که این پژوهشگران به روش مجموع موزون آنها را به یک تابع هدف واحد تبدیل کردند (Ward et al., 2003). در نمونه‌ای دیگر از تخصیص کاربری در مقیاس کلان (شهری)، هسیه و همکاران کاربری (شامل مسکونی، اداری و تجاری) و تراکم بهینه تخصیص یافته به یک منطقه شهری در سنگاپور را در قالب یک مدل ریاضی با هدف بیشینه‌سازی تراکم و کمینه‌سازی ردپای زیست‌محیطی مدل‌سازی و حل کردند (Hsieh et al., 2017).

از میان ابعاد سه‌گانه TOD، دو بعد (تراکم و تنوع کاربری‌ها) مستلزم وجود دیدگاهی کلان‌نگر و با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از محدودیت‌هاست. در این پژوهش دو بعد تخصیص بهینه تراکم و تنوع (اختلاط) کاربری‌ها در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با اهداف چندگانه مدل‌سازی شده است. مجموعه‌ای از محدودیت‌ها از جمله محدودیت‌هایی به منظور عدم تخطی از ظرفیت تحمل زیست‌محیطی و عدم مغایرت اساسی با طرح‌های فرادست نیز به مدل افزوده شده‌اند. مدل پیشنهادی در نمونه موردی منطقه ۱۲ کلانشهر تهران پیاده‌سازی و نتایج به‌دست آمده به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ساختار ادامه مقاله بدین شرح است: چارچوب نظری مقاله شامل تعریف مسئله، مدل ریاضی، روش جمع‌آوری داده‌ها و روش حل مدل در بخش دوم آمده است. بحث و یافته‌ها در بخش سوم و نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی در بخش چهارم آمده است.

۲. چارچوب نظری

۲٫۱. تعریف مسئله

همان طور که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش مسئله تخصیص تراکم و کاربری بر مبنای اصول توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور مدل‌سازی و حل شده است. مدل پیشنهادی دارای دو هدف بیشینه‌سازی تراکم تخصیص یافته به نواحی مجاور ایستگاه‌ها (و کمینه‌سازی تراکم در سایر نواحی) و کمینه‌سازی اختلاف نسبت شغل و مسکن از الگوی مطلوب آن است. الگوی مطلوب تعادل شغل و مسکن برای هر بلوک برمبنای نسبت تعداد شاغلان ساکن به تعداد خانوار ساکن در بلوک‌های مجاور هر ایستگاه تعیین شده است. متغیرهای تصمیم مدل عبارتند از تراکم سکونت و فعالیت تخصیص یافته به هر بلوک و مهم‌ترین محدودیت مدل پایبندی به کف و سقف جمعیتی پیش‌بینی شده برای محلات و مناطق شهری است. هدف از اعمال این محدودیت عدم مغایرت با طرح فرادست (طرح جامع) و عدم تخطی از خدمات پیش‌بینی شده در سطح محلات و در نتیجه عدم نیاز به بازنگری و تصویب مجدد است. همچنین به منظور عدم مغایرت اساسی با طرح فرادست (که مستلزم تصویب مجدد طرح حاضر در مراجع ذی‌صلاح است)،

1 Entropy
2 Dissimilarity
3 Jobs/Housing Balance

محدودیت‌هایی برای حداکثر و حداقل تراکم سکونت و فعالیت قابل تخصیص به هر بلوک براساس پهنه تخصیص یافته به آن در طرح فرادست نیز به مدل افزوده شده است.

۲،۲. مدل ریاضی

با توجه به آنچه در بند قبل اشاره شد، مسئله به شرح زیر مدل‌سازی شده است. اندیس‌ها، متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول شماره ۲ آمده‌اند.

هدف نخست مدل بیشینه‌سازی تراکم تخصیص یافته به مناطق مجاور ایستگاه‌ها و کمینه‌سازی تراکم در سایر مناطق است. این هدف در قالب رابطه شماره (۱) به مدل وارد شده است.

$$\max_{x} Z_1 = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=1}^{K} x_{ij}a_{ij}S_{ij}^{(k)} - \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=1}^{K} x_{ij}a_{ij}(1-S_{ij}^{(k)}) \qquad (۱)$$

همان طور که در بند قبل اشاره شد، افزایش تراکم در نواحی مجاور ایستگاه‌ها در صورتی که با بهبود وضعیت اختلاط کاربری‌ها همراه شود، علاوه‌بر افزایش استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی موجب افزایش کارآیی این سامانه (استفاده متناسب از سامانه در ساعات مختلف روز و روزهای مختلف هفته) و همچنین کاهش فواصل میان کاربری‌ها و در نتیجه افزایش مطلوبیت نسبی طرق فعال سفر (پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری) می‌گردد. از این رو اختلاط (تنوع کاربری‌ها) به‌عنوان دومین تابع هدف به مدل ریاضی پیشنهادی افزوده شده است. با توجه به آنچه در بند ۲-۳ آمد، تعادل میان واحدهای مسکونی و مشاغل از جمله مؤثرترین و پرکاربردترین شاخص‌های اختلاط کاربری است که در مدل پیشنهادی نیز از آن استفاده شده است. همان طور که در تعریف مسئله اشاره شد، تعادل مطلوب میان واحدهای مسکونی و مشاغل برابر نسبت تعداد شاغلان ساکن به خانوار ساکن بلوک‌های مجاور هر ایستگاه در نظر گرفته شده و همان‌طور که از رابطه شماره (۲) مشخص است، هدف کمینه‌سازی اختلاف نسبت مشاغل به واحدهای مسکونی از تعادل مطلوب است.

$$\min_{x,y} Z_2 = \sum_{k=1}^{K} \left| \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{y_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(C)}} - JHB^{(k)} \times \frac{x_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(R)}}\right)\right| \qquad (۲)$$

رابطه (۲) به‌دلیل وجود قدر مطلق منجر به غیرخطی شدن مدل و در نتیجه افزایش پیچیدگی محاسباتی آن می‌شود. از این رو براساس روش پیشنهادی (Yu, 2000) این تابع هدف به یک تابع خطی و یک محدودیت به شرح زیر تبدیل می‌شود. در رابطه زیر هرگاه مقدار عبارت داخل پرانتز مثبت شود، θ_k برابر صفر خواهد شد و هرگاه مقدار داخل پرانتز منفی گردد، θ_k برابر این مقدار با علامت معکوس (مثبت) خواهد گردید. در نتیجه در تابع هدف یک مقدار منفی با منفی دو برابر خود جمع و مقدار کل تابع هدف برابر قدرمطلق مقدار منفی داخل پرانتز خواهد بود.

$$\min_{x,y} Z_2 = \sum_{k=1}^{K} \left[\left(\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{y_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(C)}} - JHB^{(k)} \times \frac{x_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(R)}}\right) \right) + 2\theta_k \right] \qquad (۳)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} \frac{\frac{y_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(C)}}}{\frac{x_{ij}a_{ij}s_{ij}^{(k)}}{FAPC^{(R)}}} - JHB^{(k)} \right) + \theta_k \geq 0; \qquad (٤)$$

از آنجایی که هدف از مدل پیشنهادی، اصلاح طرح جامع است، مسئله تصمیم‌گیری محدود به مجموعه‌ای از محدودیت‌های برآمده از این طرح می‌باشد. نخستین این محدودیت‌ها محدودیت جمعیت‌پذیری و تعداد مشاغل کل منطقه است که به صورت روابط شماره (۵) تا (۸) به مدل افزوده شده است. بر این اساس کل جمعیت و مشاغل قابل بارگذاری در منطقه نمی‌تواند از حداقل و حداکثر جمعیت‌پذیری منطقه تخطی کند. نحوه محاسبه حداقل و حداکثر جمعیت‌پذیری و مشاغل منطقه در بخش روش‌شناسی آمده است.

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \leq MaxP \qquad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \geq MinP \qquad (٦)$$

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \leq MaxJ \qquad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \geq MinJ \qquad (۸)$$

علاوه‌براین به منظور عدم نیاز به بازنگری در خدمات پیش‌بینی شده برای هر یک از محلات در قالب طرح، حداقل و حداکثر تراکم تخصیص یافته به بلوک‌های هر محله به حداقل و حداکثر جمعیت‌پذیری محله‌ای که در آن واقع شده‌اند، محدود گردیده است. این امر در قالب روابط شماره شماره (۹) و (۱۰) به مدل افزوده شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

$$\sum_{j=1}^{N_i} \frac{x_{ij}\, a_{ij}}{FAPC^{(R)}} \geq MinN_i;\ \forall i = 1. \ldots . M \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} \frac{x_{ij}\, a_{ij}}{FAPC^{(R)}} \leq MaxN_i;\ \forall i = 1. \ldots . M \qquad (۹)$$

همچنین به منظور پرهیز از مغایرت اساسی با طرح جامع، با توجه به پهنه تخصیص یافته به هر قطعه در این طرح، حداکثر و حداقل تراکم قابل تخصیص به آن تعیین و در قالب روابط شماره (۱۱) و (۱۲) مقدار متغیرهای تصمیم به این حدود محدود شده است. لازم به یادآوری است که با توجه به تنوع ضوابط پهنه‌های مختلط بیشینه‌سازی تراکم مسکونی و مشاغل تخصیص یافته به هر قطعه منجر به دو سناریوی متفاوت می‌شود. از این رو برای در نظر گرفتن هر دو ضابطه از یک متغیر عدد صحیح کنترلی استفاده شده است. استفاده از این متغیر به مدل امکان می‌دهد که با توجه به اهداف تعیین شده هر یک از ضوابط را انتخاب کند و در عین حال در صورت انتخاب هر یک از دو ضابطه محدودیت متناظر با آن را توأمان بر تراکم مسکونی و مشاغل تخصیص یافته به قطعه اعمال کند.

$$x_{ij} \leq w_{ij} MaxR_{ij}^{(1)} + (1 - w_{ij}) MaxR_{ij}^{(2)};\ \forall\, i = 1. \ldots . M, j = 1. \ldots . N_i \qquad (۱۱)$$

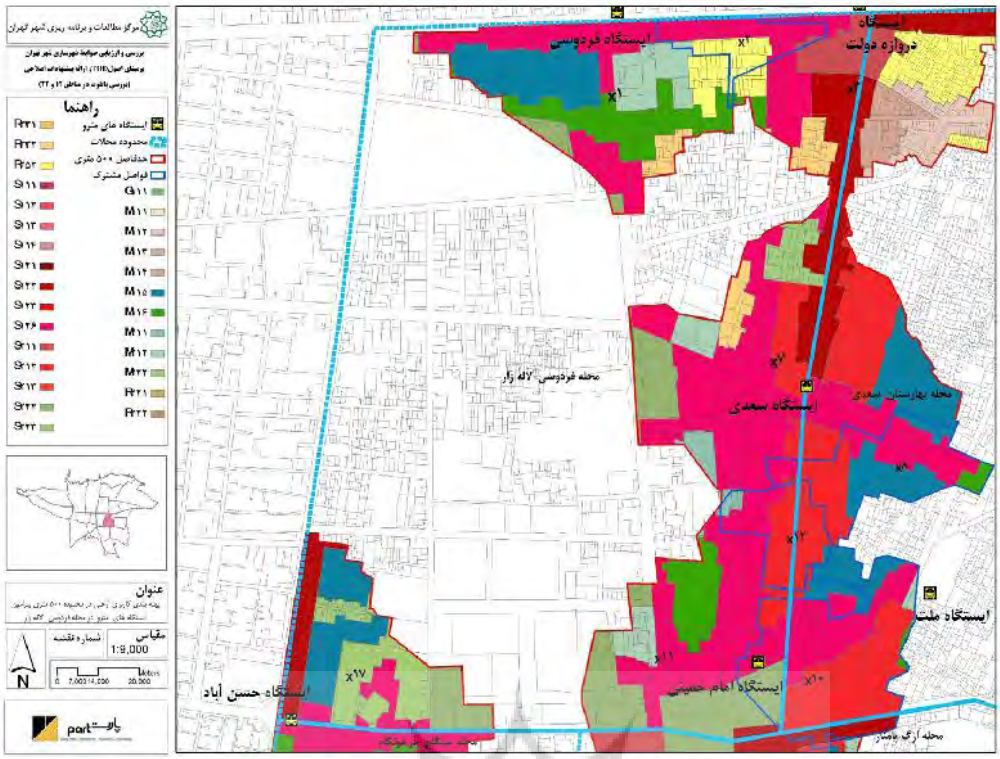
$$y_{ij} \leq w_{ij} MaxC_{ij}^{(1)} + (1 - w_{ij}) MaxC_{ij}^{(2)};\ \forall\, i = 1. \ldots . M. j = 1. \ldots . N_i \qquad (۱۲)$$

جدول شماره۲: اندیس‌ها، متغیرها و پارامترهای مدل ریاضی

اندیس‌ها		متغیرهای تصمیم	
i	اندیس شماره محلات $(i = 1. \ldots . M)$	x_{ij}	متوسط تراکم مسکونی تخصیص یافته به قطعه زام از محله i
j	اندیس شماره قطعات هر محله $(j = 1. \ldots . N_i)$	y_{ij}	متوسط تراکم فعالیت تخصیص یافته به قطعه زام از محله i
k	اندیس شماره ایستگاه حمل‌ونقل عمومی $(k = 1. \ldots . K)$	w_{ij}	متغیر صفر و یک (برابر ۱ در صورت انتخاب سناریوی نخست افزایش تراکم برای قطعه ij و صفر در غیراین‌صورت)
پارامترها			
M	تعداد محلات	$MinN_i$	کف جمعیت‌پذیری محله i
N_i	تعداد قطعات محله i	$MaxN_i$	سقف جمعیت‌پذیری محله i
K	تعداد ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی	$MaxRZ_{ij}^{(l)}$	حداکثر تراکم مسکونی پهنه قطعه زام از محله i تحت سناریوی l
a_{ij}	مساحت قابل مداخله قطعه زام محله i	$MaxC_{ij}^{(l)}$	حداکثر تراکم مشاغل پهنه قطعه زام از محله i تحت سناریوی l
$S_{ij}^{(k)}$	مقدار این پارامتر در صورتی که قطعه زام از محله i در شعاع ۵۰۰ متری ایستگاه حمل‌ونقل عمومی k واقع شده باشد، برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر صفر است.	$MinP$	کف جمعیت‌پذیری منطقه براساس طرح جامع
$FAPC^{(R)}$	سرانه زیربنای مسکونی منطقه	$MaxP$	سقف جمعیت‌پذیری منطقه براساس طرح جامع
$FAPC^{(C)}$	سرانه زیربنای فعالیت منطقه	$MinJ$	کف مشاغل قابل تخصیص به منطقه براساس طرح جامع
$JHB^{(k)}$	نسبت شاغلان ساکن به ساکنان در شعاع ۵۰۰ متری ایستگاه k	$MaxJ$	سقف جمعیت شاغل قابل تخصیص به منطقه براساس طرح جامع

۲،۳. جمع‌آوری و محاسبه مقادیر داده‌ها

به منظور استخراج داده‌های لازم برای حل مسئله از جداول اطلاعاتی فایل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی طرح جامع تهران استفاده شده است. به عنوان نمونه‌ای از فرآیند استخراج اطلاعات، در نقشه شماره ۱، نواحی ایستگاهی واقع در محله فردوسی به تفکیک پهنه‌بندی مصوب کاربری اراضی از طرح جامع محدوده منطقه ۱۲ تهران نشان داده شده است. همان طور که از نقشه پیداست، شعاع نواحی مجاور ایستگاه‌ها بر مبنای فاصله ۵۰۰ متری بر روی شبکه معابر محاسبه شده است. برای محاسبه حداکثر و حداقل تراکم قابل تخصیص نیز از ضوابط پیش‌بینی شده برای تراکم، سطح اشغال، تعداد طبقات و نوع کاربری تخصیص یافته به هر بلوک استفاده شده است.



نقشه شماره۱: نواحی ایستگاهی واقع در محله فردوسی به تفکیک پهنه‌بندی

۲،۴. روش حل مدل

برای حل مدل از نسخه ۲۴،۱،۲ نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. با توجه به این که مسئله دارای بیش از یک هدف است، برای حل دقیق مسئله می‌بایست از یکی از رویکردهای تصمیم‌گیری با اهداف چندگانه برای تبدیل مسئله به مسئله‌ای یک هدفه و یافتن جواب‌های کارآی پارتویی[1] استفاده شود. از جمله این رویکردها می‌توان به «ترکیب وزنی توابع هدف[2]»، «برنامه‌ریزی آرمانی[3]» و روش «محدودیت اپسیلون[4]» و گونه‌های بهبودیافته و تعمیم یافته آنها اشاره کرد. در این پژوهش از رویکرد محدودیت اپسیلون تعمیم یافته[5] به‌عنوان یکی از کارآترین رویکردها در تصمیم‌گیری چندهدفه استفاده شده است. مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های موجود عبارتند از محدود نبودن به جواب‌های بهینه گوشه‌ای، تأثیرناپذیری از مقیاس توابع (عدم نیاز به نرمال‌سازی)، سادگی کنترل تعداد جواب‌های کارآی تولید شده از طریق تغییر مقیاس گریدبندی و اجتناب از تکرارهای بی‌حاصل. برای تبیین نحوه عملکرد این روش مسئله برنامه‌ریزی با اهداف چندگانه زیر را در نظر بگیرید:

$$max \ (f_1(\mathbf{X}).f_2(\mathbf{X}).\ldots.f_p(\mathbf{X}))$$
$$st:$$
$$\mathbf{X} \in S \, \mathbf{X} \in S \qquad (۱۳)$$

که در آن $\mathbf{X}$ بردار متغیرهای تصمیم، $f_i(\mathbf{X})$ تابع هدف iام و S فضای شدنی مسئله است. جواب‌های کارآی پارتویی در روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته با استفاده از الگوریتم پنج مرحله‌ای ذیل محاسبه می‌شوند (Mavrotas, 2009):

گام ۱: گام نخست در این رویکرد حل مسئله برای هر یک از توابع هدف با رویکرد لکزیکوگرافیک است. در این رویکرد تابع هدف هر گام در گام‌های بعدی به محدودیت تبدیل شده و سمت راست محدودیت نیز برابر با مقدار بهینه آن تابع هدف خواهد بود و از این طریق مقادیر غیرکارآی پارتویی از بازه مقادیر توابع هدف حذف می‌شوند. مقادیر به‌دست آمده از این رویکرد، بازه مقادیر محدودیت‌ها را تشکیل می‌دهند.

گام ۲: در این گام بازه مقادیر هر یک از توابع هدف گریدبندی و مجموعه مقادیر سمت راست محدودیت‌های متناظر با توابع هدف تعیین می‌گردد. افزایش تعداد گریدها موجب افزایش دقت جواب‌های حاصل و در عین حال افزایش زمان حل مسئله می‌گردد، از این رو می‌بایست میان اهداف دقت و پیچیدگی زمانی حل تعادل برقرار گردد.

گام ۳: با تبدیل توابع هدف (به غیر از یکی) از طریق افزودن متغیرهای کمکی S_i به محدودیت‌های تساوی، مدل (۱۴) به مدل (۱۵) تبدیل می‌شود. تابع هدف مدل جدید از حاصل‌جمع تابع هدف باقی‌مانده با مضربی از مقادیر نرمال‌شده متغیرهای کمکی متناظر با سایر اهداف تشکیل می‌شود.

گام ۴: با شروع از سهل‌گیرانه‌ترین مقادیر برای سمت راست محدودیت‌های متناظر اهداف، مسئله را حل و پس از ذخیره مقادیر به‌دست آمده مقادیر سمت راست محدودیت‌ها را اضافه

1 Pareto Efficient
2 Weighting methods
3 Goal Programming (GP)
4 Epsilon Constraint
5 Augmented Epsilon Constraint (AUGMECON)

می‌کنیم. این گام تا جایی که با افزودن مقادیر سمت راست، مسئله همچنان شدنی باشد، ادامه می‌یابد.

گام ۵: در صورتی که افزایش در مقادیر سمت راست هیچ‌یک از محدودیت‌های متناظر توابع هدف امکان‌پذیر نباشد، حل خاتمه یافته و مقادیر ذخیره شده از حل‌های پیشین به عنوان خروجی (مرز پارتو) مسئله گزارش می‌شوند.

$$\max_{st:}[f_1(\mathbf{X}) + \varepsilon \times (\frac{S_1}{r_1} + \cdots + \frac{S_p}{r_p})$$
$$f_i(\mathbf{X}) - S_i = e_i \quad \forall i \in 2. \ldots . p$$
$$\mathbf{X} \in S \qquad (۱۴)$$

نمودار شماره ۱ نمایی شماتیک از به کارگیری این روش حل در مدل مقاله حاضر را نمایش می‌دهد.

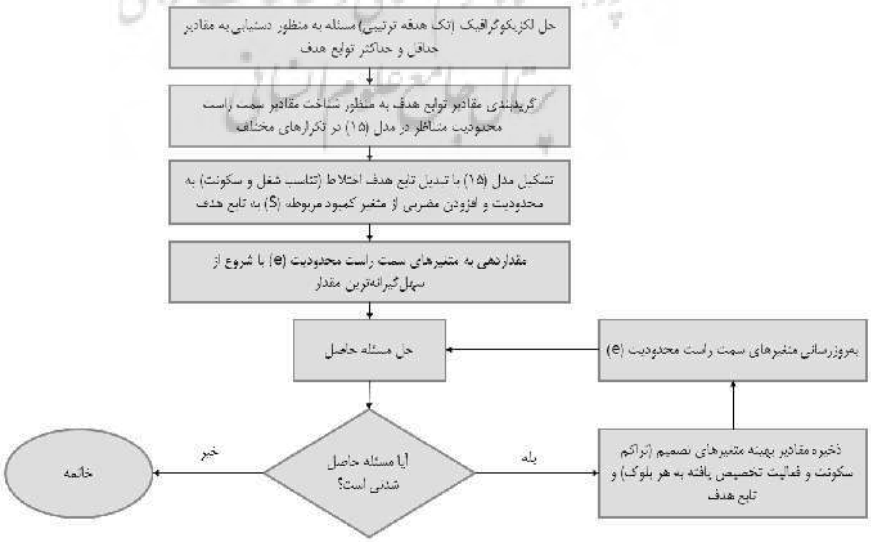
۲،۵.: نمونه موردی

طرح جامع شهر تهران (۱۳۸۶)، پس از طرح جامع تهران (۱۳۴۸) و طرح ساماندهی تهران (۱۳۷۱)، سومین سند توسعه جامع شهر تهران است. در این طرح که با رویکردی ساختاری-راهبردی تهیه شده، آمده که «این طرح سندی راهبردي براي توسعه پایدار و هماهنگ کلانشهر تهران است. در این سند که با توجه به جایگاه و نقش جهاني، ملي و منطقه تهران، چشم‌انداز توسعه ترسیم شده و راهبردهاي تحقق آن (زیست محیطي، اجتماعي، اقتصادي و کالبدي) در زمینه‌هاي لازمه مشخص گردیده است» (Boomsazegan-Paidar, 2007).

پیشنهادهای طرح جامع شهر تهران در قالب ارائه راهبردها و همچنین نقشه پهنه‌بندی فعالیتی شهر (پهنه‌های سکونت، فعالیت، مختلط و سبز) و دفترچه ضوابط و مقررات منتشر شده است (Boomsazegan-Paidar, 2007). از جمله ویژگی‌های این طرح می‌توان به پیش‌بینی جمعیت در سال افق طرح (۱۴۰۴) و تلاش برای حفظ آن، به منظور عدم عدول از ظرفیت‌های زیستی شهر تهران اشاره کرد. از همین رو هرگونه پیشنهاد ضابطه‌ای که منجر به افزایش جمعیت‌پذیری شهر تهران تا سال افق طرح گردد، به عنوان «مغایرت اساسی» محسوب شده که باید به تصویب «شورای عالی شهرسازی و معماری ایران» برسد (Development, 2015).

نمونه مورد بررسی در این پژوهش منطقه ۱۲ شهرداری تهران را شامل می‌شود. این منطقه با هزار و ۶۰۱ هکتار مساحت (حدوداً دودرصد مساحت کل تهران) در وضع موجود دارای جمعیتی معادل ۲۴۰،۷۲۰ نفر (نزدیک به سه درصد جمعیت کل تهران) است. بخش اعظم بازار تهران به عنوان قلب اقتصادی این کلانشهر در این منطقه واقع شده است. این مسئله موجب شده تا منطقه ۱۲ باوجود مساحت و جمعیت نسبتاً کم، با ۱۴ ایستگاه دارای بیشترین تعداد ایستگاه مترو بهره‌برداری شده در میان مناطق کلانشهر تهران باشد. تعدد ایستگاه‌های مترو منطقه موجب شده است که در وضع موجود ۵۸ درصد از مساحت منطقه تحت پوشش (در شعاع قابل پیاده‌روی) حداقل یک ایستگاه مترو قرار داشته باشد و از این منظر پس از منطقه ۱۱ رتبه دوم را در میان مناطق تهران به خود اختصاص دهد (ر.ک. جدول شماره ۳ و نقشه شماره ۲). با وجود فراهم بودن زیرساخت‌های حمل‌ونقلی لازم برای توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور، منطقه ۱۲ از منظر انطباق با این اصول جایگاه مناسبی در اختیار ندارد.

با توجه به پیشنهادهای طرح جامع در پهنه‌بندی منطقه ۱۲ شهر تهران (به عنوان نمونه مطالعاتی پژوهش حاضر) براساس حداکثر (۱۰۰درصد) میزان تحقق‌پذیری تراکم‌های پیشنهادی و با در نظر گرفتن بعد خانوار به میزان (۳،۲)[1]، حداکثر میزان جمعیت‌پذیری منطقه ۱۲ براساس طرح جامع معادل ۴۰۱ هزار و ۹۹۰ نفر می‌باشد. بر همین اساس جمعیت‌پذیری بلوک‌ها و محلات نیز محاسبه شده که برای پرهیز از طولانی شدن مقاله از بیان آنها خودداری شده است.

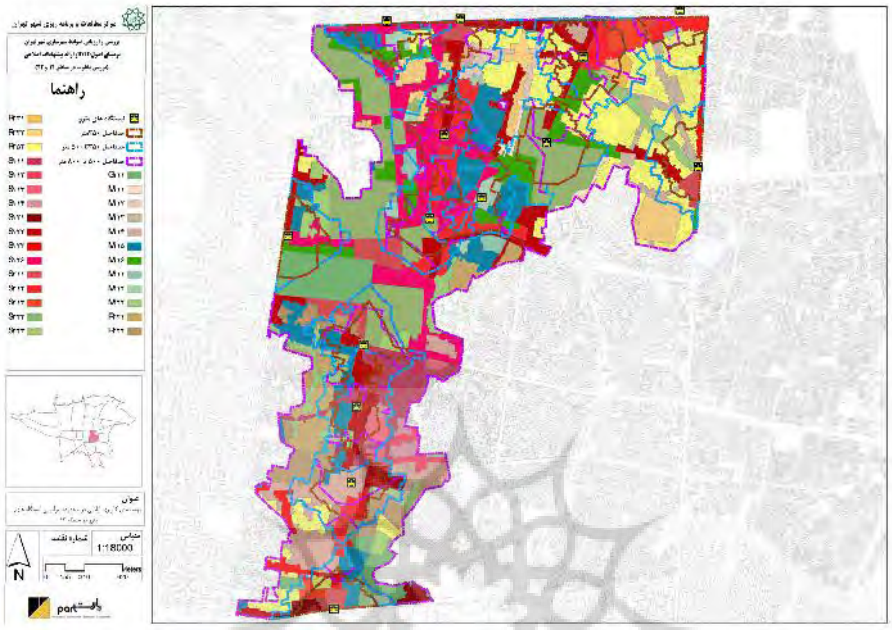


نمودار شماره۱: نمودار جریان حل مدل پیشنهادی

۱ بعد خانوار منطقه ۱۲ براساس سرشماری ۱۳۹۰

جدول شماره۳: نسبت مساحت تحت پوشش سامانه مترو به کل مساحت منطقه

	مناطق																					کل
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	
نسبت مساحت محدوده حول ایستگاه به کل مساحت منطقه	۰,۰۸	۰,۳۱	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۱۷	۰,۴۷	۰,۴۸	۰,۳۴	۰,۲۱	۰,۲۷	۰,۷۹	۰,۵۸	۰,۳۶	۰,۲۵	۲۰,۱	۰,۲۹	۰,۳۶	۰,۰۲	۰,۰۹	۰,۰۸	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۱۸



نقشه شماره۲: نواحی مجاور ایستگاه‌های مترو در منطقه ۱۲ تهران

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

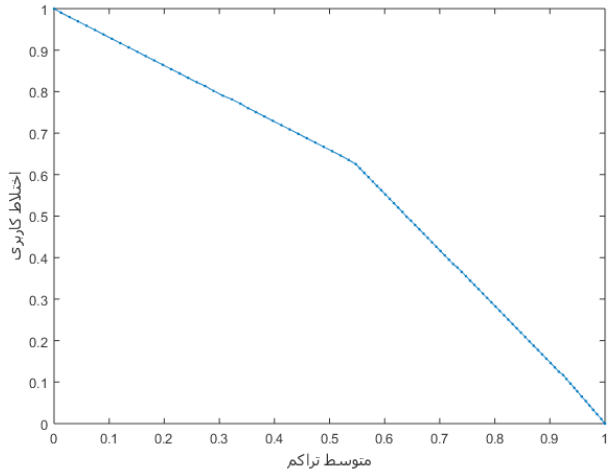
نمودار شماره ۲ مرز کارآی پارتویی حاصل از حل مسئله را به ازای توابع هدف ۱ و ۲ نشان می‌دهد. با توجه به تفاوت ابعاد توابع، در نمایش نمودار مقادیر نرمال‌سازی شده این توابع مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از آنجایی که یکی از دو تابع، از نوع بیشینه‌سازی و دیگری از نوع کمینه‌سازی است، از توابع متفاوتی (به ترتیب روابط ۱۶ و ۱۷) برای نرمال‌سازی مقادیر استفاده شده است تا بهترین مقدار هر تابع برابر۱ و بدترین مقدار برابر صفر قرار گیرد.

$$r_i = \frac{x_i - \min_x x_i}{\max_x x_i - \min_x x_i} \qquad (۱۶)$$

$$r_i = \frac{\max_x x_i - x_i}{\max_x x_i - \min_x x_i} \qquad (۱۷)$$

تحلیل رگرسیون نتایج به‌دست آمده برای توابع هدف، نمایانگر کشش ۱,۰۱۷- هدف اختلاط نسبت به هدف تراکم می‌باشد. به عبارت دیگر یک درصد افزایش در مقدار تابع هدف تراکم منجر به کاهش ۱,۰۱۷ درصد در مقدار تابع هدف اختلاط خواهد شد. نتایج تحلیل رگرسیون در جدول شماره ٤ آمده است. همان طور که از جدول پیدا است، رابطه میان این دو تابع به لحاظ آماری معنی‌دار است. گفتنی است همان طور که از نمودار نیز پیداست، این میزان در تمامی نقاط یکسان نیست و با عبور تراکم از آستانه‌ای مشخص، هر واحد افزایش در متوسط تراکم منجر به کاهش بیشتری در شاخص اختلاط می‌گردد.

به منظور دستیابی به مجموعه پاسخ‌های کارآی پارتویی مسئله، بازه مقادیر تابع هدف دوم (اختلاط) به ۱۰ بازه تقسیم و مقادیر بهینه توابع هدف و متغیرهای تصمیم در هریک از ۱۱ نقطه حاصل از حل مدل با این تقسیم‌بندی به دست آمد که نتایج آن در جدول شماره ٥ آمده است. نمودارهای شماره ۳ تا ٥ نیز به ترتیب نمایانگر تغییرات متوسط تراکم، جمعیت ساکن و اختلاط کاربری به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری (بهبود شاخص اختلاط کاربری) است. همان طور که از این نمودارها پیداست، اولاً با وجود روندهای مشابه در تمامی ایستگاه‌ها (کاهش مقادیر متوسط تراکم و جمعیت ساکن)، شدت این روندها (شیب نمودارها) یکسان نیست. به عبارت دیگر شیب کاهش تراکم به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری در ایستگاه‌های غرب منطقه که در منطقه بازار تهران (با غلبه فعالیت) واقع‌اند نسبت به ایستگاه‌های شرقی منطقه که غلبه با کاربری مسکونی است، به مراتب کمتر است. همین مسئله در مورد تغییرات جمعیت به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری نیز صادق است. همچنین همان طور که از نمودار شماره ٤ مشخص است، پتانسیل بهبود شاخص اختلاط کاربری نیز در ایستگاه‌های شرقی منطقه به مراتب نسبت به ایستگاه‌های غربی بالاتر است. ثانیاً در مواردی شاهد تغییر روند در برخی از ایستگاه‌ها و کاهش مقادیر تراکم و جمعیت در

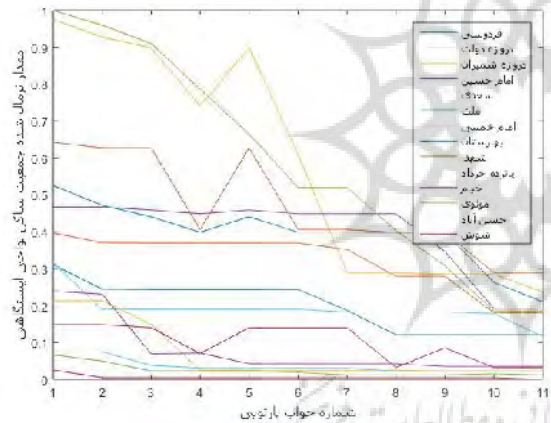


نمودار شماره۲: مرزپارتویی حل مسئله براساس تابع هدف اول و دوم

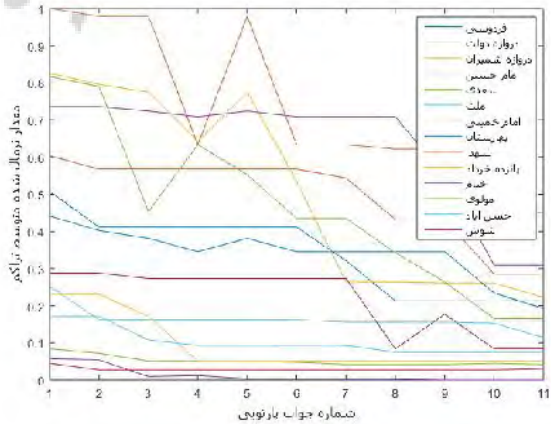
جدول شماره٤: نتایج تحلیل رگرسیون نتایج

ضرایب مدل		ضرایب متغیرها			
P_مقدار	مقدار ضریب R^2	P_مقدار	آماره آزمون	مقدار ضریب	
۰,۰۰۰	۰,۹۷۱	۰,۰۰۰	-۰۳٦٥۷,	-۱,۰۱۷	متغیر مستقل (تراکم)
		۰,۰۰۰	۱۰٤,٦	۰,۹۲۱	عرض از مبدا

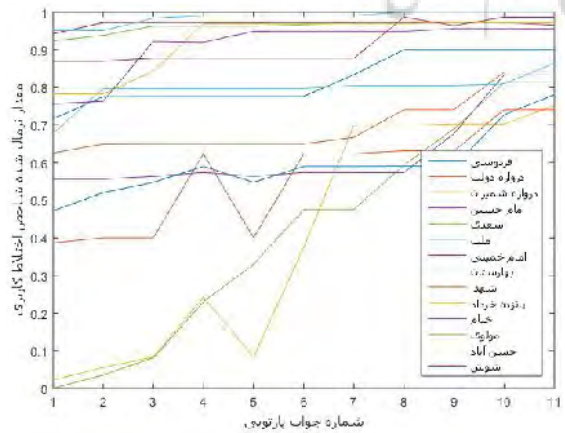
برخی ایستگاه‌ها در ازای افزایش آن در برخی دیگر از ایستگاه‌ها هستیم. نکته دوم از وجوه ممیز رویکرد حاضر در برنامه‌ریزی نسبت به بهینه‌سازی انفرادی تراکم و اختلاط در هر یک از نواحی ایستگاهی است. به‌عبارت دیگر مدل حاضر به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد هزینه‌ها و فواید تغییر در تراکم و اختلاط ایستگاه‌ها را با یکدیگر مقایسه و ایستگاه‌هایی که اعمال تغییر در تراکم و پهنه‌بندی آنها بیشترین مطلوبیت را ایجاد می‌کند، انتخاب کنند. گفتنی است که مدل پیشنهادی با اندکی افزایش در زمان حل قادر به تولید تعداد بیشتری از پاسخ‌های کارآی پارتویی است. به‌عنوان نمونه نمودار شماره ۱ نمایانگر یک‌صد پاسخ کارآی پارتویی مسئله می‌باشد. همان طور که از نمودار پیداست، این روش با افزایش دقت، قادر به تخمین تمامی نقاط واقع بر مرز پارتویی (گزینه‌های تصمیم‌گیری پیشِ روی مجموعه مدیریت شهری) است.



نمودار شماره٤: تغییرات مقادیر نرمال شده جمعیت ساکن در نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری‌ها



نمودار شماره۳: تغییرات مقادیر نرمال‌شده متوسط تراکم نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری‌ها



نمودار شماره۵: تغییرات مقادیر نرمال شده نرخ اختلاط کاربری‌ها نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربری‌ها

جدول شماره۵: نتایج (پاسخ‌های بهینه پارتویی) حل مدل

	پاسخ	ایستگاه فردوسی	ایستگاه دروازه دولت	ایستگاه دروازه شمیران	ایستگاه امام حسین	ایستگاه سعدی	ایستگاه ملت	ایستگاه امام خمینی	بهارستان	میدان شهدا	۱۵ خرداد	ایستگاه خیام	ایستگاه مولوی	ایستگاه حسن‌آباد	ایستگاه شوش
۱	اختلاط	۱۳۳۳٤	۱۷۰۰۳	٤۱۷٤۸	۲۰۰۱۵	۲۸۸۰	۱۳۵٤۰	۱۱۱٤	۲۲۵۱۰	۲۷۵۰۵	۹۱٦٦	۱۰۲۸۰	٤۲۷۸۸	۳۲۳۱	٦٤۰٤
	متوسط تراکم	۱۷۸	۲۱۰	۲۸٤	۲۵٤	۳۷	۹۳	۲٤	۱۵٦	۳٤۲	۸٦	۲۸	۲۸۱	٦٦	۱۰۵
	جمعیت ساکن	۱٤۱۹٤	۱۸۰۳۲	٤۳۵۸۳	۲۰۹٦۷	۵٤۲۰	۱۵۸۲٦	٤٦۲۹	۲٤۵۳٤	۲۸۱۳٦	۱۱۳۹۰	۱۲۵۳٤	٤٤۵۱۵	٤۲٤۵	۷٦۹۵
۲	اختلاط	۱۰٤۹۹	۱۵۸۷۸	۳۹٦۹۱	۲۰۰۱۵	۲۱۷۲	۸۱٦۲	۲۵۲	۲۰۲۰۲	۲٦۸۵۹	۹۱٦٦	۹۹۱٦	٤۱۰۷٦	۳۲۳۱	٦٤۰٤
	متوسط تراکم	۱٤٦	۱۹۸	۲۷٤	۲۵٤	۳۳	٦۳	۱۸	۱٤۳	۳۳۵	۸٦	۲۷	۲۷۲	٦٦	۱۰۵
	جمعیت ساکن	۱۱٦۸۵	۱۷۰۳٦	٤۲۱٦۵	۲۰۹٦۷	٤۷۹۳	۱۰۷٤٦	۳۳۵۲	۲۲٤۹۲	۲۷۵٦۵	۱۱۳۹۰	۱۲۲۱۲	٤۳۰۰۰	٤۲٤۵	۷٦۹۵
۳	اختلاط	۱۰٤٦٤	۱۵۸٤۳	۳۸٤۳٤	۱۹٦٦٤	۱۰۰۸	۸۱٦۲	۲۵۲	۷۱۸۸۸	۲٦۸٦۰	٦٤۲۳	۲۹۹۸	۳۸۹۵٤	۱٦٦۵	٦۰۳۷
	متوسط تراکم	۱٤٦	۱۹۸	۲٦۷	۲۵۰	۲٦	٦۳	۱۸	۱۳٦	۳۳۵	٦٦	۱۲	۱٦۰	٤۵	۱۰۰
	جمعیت ساکن	۱۱٦۵٤	۱۷۰۰۵	٤۰۹۸۰	۲۰٦۵٦	۳۷۳۷	۱۰۷٤٦	۳۳۵۲	۲۱۳۲۸	۲۷۵٦۵	۸۸۰۵	۵٤۸۰	٤۱۰٦۲	۲۸۵۹	۷۳۷۰
٤	اختلاط	۱۰٤٦٤	۱۵۸٤۳	۸۳۱۷۱	۱۹۲۳٦	۱۰۰۸	۸۱٦۲	۲۵۲	۱۷۰۹٦	۱۷٤۰۸	۱۰۹۵	۳۰۸٤	۳۳٦٦۲	۱۳٦۲	۳۰۳٦
	متوسط تراکم	۱٤٦	۱۹۸	۲۲۳	۲٤۵	۲٦	٦۳	۱۸	۱۲٤	۲۲۰	۲٦	۱۳	۲۲۰	٤۰	۱۰۰
	جمعیت ساکن	۱۱٦۵٤	۱۷۰۰۵	۳٤۲٦٤	۲۰۲۲۸	۳۷۳۷	۱۰۷٤٦	۳۳۵۲	۱۹۵۳۷	۱۸۱۱٤	۳٤۷۷	۵۵٦۷	۳٤۷۷۱	۲۵۵٦	۷۳۷۰
۵	اختلاط	۱۰٤٦٤	۱۵۸٤۳	۳۸٤۳٤	۱۹٦٦٤	۱۰۰۸	۸۱٦۲	۲۵۲	۱۸۸۸۷	۲٦۸٦۰	۱۰۹۵	۱۸٦۲	۲۸٤٤٦	۱۳٦۲	٦۰۳۷
	متوسط تراکم	۱٤٦	۱۹۸	۲٦۷	۲۵۰	۲٦	٦۳	۱۸	۱۳٦	۳۳۵	۲٦	۱۰	۱۹۳	٤۰	۱۰۰
	جمعیت ساکن	۱۱٦۵٤	۱۷۰۰۵	٤۰۹۸۰	۲۰٦۵٤	۳۷۳۷	۱۰۷٤٦	۳۳۵۲	۲۱۳۲۸	۲۷۵٦۵	۳٤۷۷	٤۳٤٤	۳۰۵۵٤	۲۵۵٦	۷۳۷۰
٦	اختلاط	۱۰٤٦٤	۱۵۸٤۳	۲٦۱۲۲	۱۹۲۳۵	۸۵۳	۸۱٦۲	۲۵۲	۱۷۰۹٦	۱۷٤۰۹	۱۰۹۵	۱۸٦۱	۲۲۲۷۵	۱۳٦۲	٦۰۳۷
	متوسط تراکم	۱٤٦	۱۹۸	۱۸۷	۲٤۵	۲۵	٦۳	۱۸	۱۲٤	۲۲۰	۲٦	۱۰	۱۵٤	٤۰	۱۰۰
	جمعیت ساکن	۱۱٦۵٤	۱۷۰۰۵	۲۸٦٦۸	۲۰۲۲۸	۳۵۸۲	۱۰۷٤٦	۳۳۵۲	۱۹۵۳۷	۱۸۱۱٤	۳٤۷۷	٤۳٤٤	۲٤۳۸۳	۲۵۵٦	۷۳۷۰
۷	اختلاط	۸۰٤۱	۱۵۱۱۰	۱۲۳۹٦	۱۹۲۳٦	۵۳۹	۷۸٤۸	۲۵۲	۱۷۰۹٦	۱۷٤۰۹	۱۰۹۵	۱۸٦۲	۲۲۲۷۵	۱۳٦۲	٦۰۳۷
	متوسط تراکم	۱۱٦	۱۹۰	۹۷	۲٤۵	۲۳	٦۱	۱۸	۱۲٤	۲۲۰	۲٦	۱۰	۱۵٤	٤۰	۱۰۰
	جمعیت ساکن	۹۲۳۱	۱٦۲۷۲	۱٤۹٤۲	۲۰۲۲۸	۳۳٦۸	۱۰٤۳۲	۳۳۵۲	۱۹۵۳۷	۱۸۱۱٤	۳٤۷۷	٤۳٤٤	۲٤۳۸۳	۲۵۵٦	۷۳۷۰
۸	اختلاط	۵۲۱۹	۱۱۹۸۳	۱۲۳۹٦	۱۹۲۳٦	۵۳۹	۷۸٤۸	۲۵۲	۱۷۰٦٦	۱۷۰۵۲	۱۰۹۵	۱۸٦۲	۱۷۲۸۱	۹۷۲	۱٤۱۷
	متوسط تراکم	۸۰	۱۵۳	۹۷	۲٤۵	۲۳	٦۱	۱۸	۱۲٤	۲۱٦	۲٦	۱۰	۱۲۳	۳٤	۳۷
	جمعیت ساکن	٦٤۰۹	۱۳۱٤٦	۱٤۹٤۲	۲۰۲۲۸	۳۲٦۸	۱۰٤۳۲	۳۳۵۲	۱۹۵۱۰	۱۷۷۹۸	۳٤۷۷	٤۳٤٤	۱۹۳۸۹	۲۱٦٦	۲۷۵۰
۹	اختلاط	۵۲۱۹	۱۱۹۸٤	۱۲۲۳۱	۱٤۸۵٤	۵۳۹	۷۸٤۸	۲۵۲	۱۷۰٦٦	۱۷۰۵۲	۱۰۰۸	۱۵٤۲	۱۳۲۰۳	۹۷۲	۳٦۹۰
	متوسط تراکم	۸۰	۱۵۳	۹٦	۱۹۲	۲۳	٦۱	۱۸	۱۲٤	۲۱٦	۲٦	۹	۹۷	۳٤	٦۸
	جمعیت ساکن	٦٤۰۹	۱۳۱٤٦	۱٤۷۷۷	۱۵۸٤۷	۳۲٦۸	۱۰٤۳۲	۳۳۵۲	۱۹۵۱۰	۱۷۷۹۸	۳۳۹۰	٤۰۲٤	۱۵۳۱۲	۲۱٦٦	۵۰۲۳
۱۰	اختلاط	۵۲۱۹	۷۷٦۹	۱۲۲۳۱	۸۲٤۹	٦۹٤	۷٦۷۲	۲۵۲	۱۱۲۸۳	۱۲۳۹۹	۱۰۰۸	۱۵٤۲	۷۹۷۹	۹۷۲	۱٤۱۷
	متوسط تراکم	۸۰	۱۰٤	۹٦	۱۱۲	۲٤	٦۰	۱۸	۸۷	۱٦۰	۲٦	۹	٦٤	۳٤	۳۷
	جمعیت ساکن	٦٤۰۹	۸۹۳۱	۱٤۷۷۷	۹۲٤۱	۳٤۲۳	۱۰۲۵٦	۳۳۵۲	۱۳۷۲۸	۱۳۱٤۵	۳۳۹۰	٤۰۲٤	۱۰۰۸۷	۲۱٦٦	۲۷۵۰
۱۱	اختلاط	۵۲۱۹	۷۷٦۹	۱۰۱۵۹	۸۲٤۹	۵۳۹	۵۰۲٦	٤۵	۹۰۳۰	۱۲۳۹۹	۱۰۰۸	۱۵٤۲	۷۹۷۹	۹۷۲	۱٤۱۷
	متوسط تراکم	۸۰	۱۰٤	۸۳	۱۱۲	۲۳	٤۷	۱۹	۷۳	۱۵۹	۲٦	۹	٦٤	۳٤	۳۷
	جمعیت ساکن	٦٤۰۹	۸۹۳۱	۱۲۷۰۵	۹۲٤۱	۳۲٦۸	۷۹۲۵	۳٦۲۷	۱۱٤۷٤	۱۳۱٤۵	۳۳۹۰	٤۰۳٤	۱۰۰۸۷	۲۱٦٦	۲۷۵۰

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی

در این پژوهش مسئله تخصیص تراکم و کاربری با هدف بیشینه‌سازی انطباق با اصول توسعه حمل‌ونقل عمومی‌محور (TOD) ـ به‌طور خاص دو شاخص بیشینه‌سازی تراکم تخصیص یافته به نواحی مجاور ایستگاه‌ها و بهینه‌سازی اختلاط کاربری‌ها در این نواحی ـ با هدف کاهش مسافت سفرهای کاری و غیرکاری روزمره و افزایش مطلوبیت طرق جایگزین سفر (پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری و استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی) در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با اهداف چندگانه مدل‌سازی و حل گردید. توابع هدف مورد استفاده بیشینه‌سازی تفاضل تراکم تخصیص یافته به نواحی ایستگاهی از سایر نواحی و بیشینه‌سازی انطباق نسبت مشاغل به واحدهای مسکونی در نواحی ایستگاهی با الگوی تعداد شاغل ساکن به خانوار ساکن در مجاورت هر ایستگاه و محدودیت‌های عمده مدل شامل عدم تخطی (مغایرت اساسی) از پیش‌بینی‌های طرح جامع برای سقف و کف جمعیت منطقه و محلات آن و همچنین حداکثر و حداقل تراکم سکونت فعالیت قابل تخصیص بر مبنای این طرح هستند. برای تبدیل مسئله با اهداف چندگانه به مسئله‌ای با یک هدف و به‌دست آوردن جواب‌های کارآی پارتویی از روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته استفاده گردید و نتایج حاصل به لحاظ آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

براساس یافته‌های این پژوهش ضریب کشش اختلاط نسبت به

تراکم برابر ۱٫۰۱۷- است. به عبارت دیگر بهبود یک درصدی در شاخص تراکم مستلزم تضعیف ۱٫۰۱۷ درصدی در شاخص اختلاط کاربری‌ها خواهد بود. انتخاب ترکیب بهینه اوزان نسبی این دو تابع مستلزم در نظر گرفتن ۱) اثرات نسبی هر یک از دو شاخص بر شاخص‌هایی چون نرخ مالکیت خودرو و متوسط مسافت طی شده با خودرو و ۲) مسائل و معضلات هر ایستگاه در مقیاس خرد و اهداف و راهبردهای مجموعه مدیریت شهری برای هریک از نواحی ایستگاهی است. تجربیات جهانی نمایانگر اثر نسبی بیشتر اختلاط نسبت به تراکم می‌باشد، اما از آنجایی که این نتایج به شدت به الگوهای شهرسازی، حمل‌ونقل و الگوهای رفتاری شهروندان وابسته است، تصمیم‌گیری دقیق در این خصوص مستلزم مطالعاتی مجزا به منظور ارزیابی اثرات این دو عامل و عوامل مشابه بر الگوی رفتار حمل‌ونقلی شهروندان تهران می‌باشد.

از جمله توسعه‌های آتی بالقوه پژوهش حاضر می‌توان به افزودن جنبه‌های مربتط به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و به‌ویژه حمل‌ونقل عمومی به منظور تبدیل مدل به مدل یکپارچه برنامه‌ریزی شهری و حمل‌ونقل اشاره کرد. در این حالت مدل قادر خواهد بود به طور همزمان در خصوص تخصیص تراکم، تخصیص ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی و احداث، تغییر مسیر یا تعریض شبکه معابر بر مبنای تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر تصمیم‌گیری کند. علاوه‌براین همان طور که پیش‌تر اشاره شد، در این مدل تخصیص تراکم با هدف انطباق حداکثری با توسعه حمل‌ونقل عمومی محور در عین عدم تخطی (مغایرت اساسی) با طرح‌های فرادست (طرح جامع کلانشهر تهران) بوده است. اما مدل پیشنهادی به سادگی قابلیت افزایش اهداف و محدودیت‌ها و تبدیل شدن به ابزار اصلی پشتیبان تصمیم‌سازی در تهیه و تدوین طرح‌های جامع و تفصیلی آتی تهران و سایر کلانشهرها را دارا است.

Refrences:

- BERNICK, M. & CERVERO, R. 1997. Transit Villages in the 21st Century, New York, McGraw-Hill.
- Boomsazegan-Paydar. 2007. Tehran Comprehensive Plan (Main Document). Center of Studies and Research for Tehran.
- BRES, A. 2014. Train stations in areas of low density and scattered urbanisation: towards a specific form of rail oriented development. Town Planning Review, 85, 261-272.
- CERVERO, R. & KOCKELMAN, K. 1997. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2, 199-219.
- CHEN, M., HUANG, Z. & ZHANG, M. A GIS Based Model for Land Use and Transit-Integrated Corridor. 12th International Conference of Transportation Professionals, 2012 Beijing. ASCE, 1598-1607.
- DEVELOPMENT, H. C. O. A. A. U. 2015. Urban Master Planning statute. In: DEVELOPMENT, H. C. O. A. A. U. (ed.). Tehran: Iran Ministry of Road and Urban Development.
- HSIEH, S., SCHULER, N., SHI, Z., FONSECA, J. A., MERECHAL, F. & SCHLUETER, A. 2017. Defining density and land uses under energy performance targets at the early stage of urban planning processes. Energy Procedia, 301-306.
- KUZMYAK, J. R., DOUGLAS, G. B. & SPIELBERG, F. 2003. Land-use and Site Design: Traveler Response to Transportation System Change. Washington D.C.: Transit Cooperative Research Program (TCRP).
- LI, J., GUO, X. & HU, T. Station Planning Model of a Transit Vllage around a Subway. COTA International Conference of Transportation Professionals, 2016 Shanghai. 924-931.
- LIN, J. J. & GAU, C. C. 2006. A TOD Planning Model to Review the Regulation of Allowable Development Densties around Subway Stations. Land Use Policy, 23, 353-360.
- LITMAN, T. 2015. Land Use Impacts on Transport: How Land Use Patterns Affect Travel Behavior. Victoria: Victoria tTransport Policy Institute.
- MA, X., CHEN, X., LI, X., DING, C. & WANG, Y. 2018. Sustainable station-level planning: An integrated transport and land use design model for transit-oriented development. Journal of Cleaner Production, 170, 1052-1063.
- MANVILLE, M. & SHOUP, D. 2005. People, Parking, and Cities. Journal Of Urban Planning And Development, 131, 233-245.
- MAVROTAS, G. 2009. Effective implementation of the ε-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. Applied Mathematics and Computation, 213, 455-465.
- SPEARS, S., BOARNET, M. G. & HANDY, S. 2010. Senate Bill 375 - Research on Impacts of Transportation and Land Use-Related Policies. California Air Resources Board.
- WANG, X., KHATTAK, A. & ZHANG, Y. 2013. Is Smart Growth Associated with Reductions in CO2 Emissions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board

(Transportation), 2375**,** 62-70.

- WARD, D. P., MURRAY, A. T. & PHINN, S. R. 2003. Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change. The Annals of Regional Science, 37**,** 131-148.
- YU, C. S. L., H. L. 2000. A robust optimization model for stochastic logistic problems. International Journal of Production Economics, 64**,** 385-397.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی