

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

## مطالعه موردی: منطقه ۲۱ شهر تهران<sup>۱</sup>

مهرداد رحمانی<sup>۲</sup> - 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 علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

بهرام امین‌زاده گوه‌ریزی - دانشیار شهرسازی، دانشکده شهرسازی و معماری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
شبیوا نوری - کارشناس ارشد شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
بابک امین‌زاده گوه‌ریزی - 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 مناقشه‌برانگیز 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 عمومی محور (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 محدودیت‌اپسیلون تعمیم یافته به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی تک هدف تبدیل گردیده است. در نهایت مدل پیشنهادی در نمونه موردی منطقه ۱۲ کلانشهر تهران پیاده‌سازی و نتایج به دست 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 پیش‌روی 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 محدودیت‌اپسیلون تعمیم یافته.

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

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

## ۱. مقدمه

توسعه حمل و نقل عمومی محور از جمله رویکردهایی است که در دهه های اخیر و در کنار رویکردهایی چون رشد هوشمند و نوسازگرایی به منظور توسعه پایدار شهری پیشنهاد و از سوی سیاست گذاران و تصمیم سازان شهری مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به معضلات و مشکلات عمده پیش روی کلانشهرهای کشور به ویژه تهران، از جمله آلودگی هوا و ترافیک به نظر می رسد 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 حمل و نقل عمومی، پیاده روی و دوچرخه سواری) می تواند در حرکت به سمت پایداری مؤثر باشد. تعاریف متعددی برای توسعه حمل و نقل عمومی محور ارائه شده است که از جمله جامع ترین آنها می توان به تعریف برنیک و سرورو اشاره کرد. این پژوهشگران توسعه حمل و نقل عمومی محور را «یک باهمستان فشرده با کاربری های مختلط به مرکزیت یک ایستگاه حمل و نقل عمومی که از طریق طراحی، ساکنان و شاغلان را به کاهش استفاده از اتومبیل و استفاده از طرق دیگر حمل و نقل (حمل و نقل عمومی، پیاده و دوچرخه) ترغیب می کند» تعریف کرده اند (Bernick and Certero, 1997).

به طور کلی توسعه حمل و نقل عمومی محور در بعد حمل و نقل دارای سه هدف عمده است: ۱) کاهش تعداد سفرهای صورت گرفته با وسایل نقلیه موتوری، ۲) افزایش سهم طرق دیگر حمل و نقل (پیاده روی و دوچرخه سواری) از کل سفرها و ۳) کاهش طول سفرهای موتوری و افزایش سطح اشغال وسیله نقلیه (تشویق سفرهای کوتاه تر و افزایش سفر با وسایل حمل و نقل عمومی و استفاده اشتراکی از خودرو) (Cervero and Kockelman, 1997). بیگیری این اهداف در الگوی TOD از طریق افزایش تراکم و اختلاط جمعیت و فعالیت در پیرامون ایستگاه حمل و نقل عمومی و بهبود کیفیت های طراحی محیط برای پیاده روی و دوچرخه سواری صورت می پذیرد. از همین رو سرورو و کاکلمن ابعاد TOD را در سه دسته تراکم<sup>۲</sup>، تنوع<sup>۳</sup> و طراحی<sup>۴</sup> طبقه بندی کرده اند (Cervero and Kockelman, 1997). در ادامه پژوهش های 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 شده اند.

پژوهش های گوناگون نمایانگر اثر منفی قابل توجه افزایش تراکم در اطراف ایستگاه های مترو بر نرخ مالکیت خودرو، مسافت طی شده با خودروی شخصی و سهم خودروی شخصی در سفرهای روزمره شهروندان است. به عنوان مثال مطالعه ای بر داده های مربوط به تراکم و سفر در ۲ شهر بزرگ ایالات متحده آمریکا نشان داد که کاهش مسافت طی شده با خودروی شخصی نسبت به افزایش تراکم ۰/۵۸- است. به عبارت دیگر بنا بر یافته های

این پژوهش افزایش ۱۰ درصدی در تراکم یک منطقه موجب کاهش ۵/۸ درصدی در مسافت طی شده با خودروی شخصی می گردد (Manville and Shoup, 2005). این اثر به ویژه در صورت دسترس پذیری سامانه حمل و نقل عمومی با کیفیت و همچنین در صورت اختلاط مناسب کاربری ها به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد (Litman, 2015). از این رو اکثر پژوهشگران بر نقش تراکم توسعه به عنوان یکی از مؤلفه های اساسی تشکیل دهنده توسعه حمل و نقل عمومی محور تأکید دارند. با این وجود مطالعات اندکی در راستای محاسبه تراکم بهینه توسعه در نواحی مجاور ایستگاه ها صورت گرفته است. لین و گائو در یکی از این معهود مطالعات، مسئله تخصیص تراکم در نواحی ایستگاهی را در قالب یک مسئله چندهدفه با اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مدل سازی و حل کردند. در این مدل تابع هدف اقتصادی، بیشینه سازی تولید سفر با سامانه ریلی، تابع هدف اجتماعی، کمینه سازی اختلاف تراکم و خدمات موجود میان نواحی ایستگاهی و غیرایستگاهی، تابع هدف زیست محیطی، بیشینه سازی نسبت خدمات به زیربنای تجاری و مسکونی و متغیرهای تصمیم، تراکم مسکونی و تجاری تخصیص یافته در نظر گرفته شده اند. محدودیت های مدل پیشنهادی این پژوهشگران نیز عبارتند از حدود بالا و پایین هر کاربری بر مبنای ضوابط موجود و حداکثر ظرفیت توجیه پذیر، نسبت کاربری های 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 بهینه سازی تراکم در کریدورهای حمل و نقل عمومی ارائه کردند. اهداف این مدل عبارتند از دسترس پذیری، مزایای اقتصادی، اثرات زیست محیطی و استفاده از حمل و نقل عمومی. این پژوهشگران با استفاده از روش TOPSIS اهداف فوق را ترکیب و مدل نهایی را در قالب یک مسئله بهینه سازی خطی تک هدفه مدل سازی کردند (Chen et al., 2012).

برس با اشاره به اثرات متغیرهایی چون پراکنش و تراکم توسعه های مسکونی و شبکه معابر محلی بر دسترس پذیری ایستگاه های حمل و نقل عمومی، مفهومی جایگزین برای شعاع دسترسی پذیری ایستگاه ارائه می کند (Bres, 2014). برای این منظور نواحی مجاور ایستگاه ها بر مبنای زمان و وسیله سفر (پیاده روی، دوچرخه سواری و استفاده از اتوبوس) به چهار بخش تقسیم می شود. بر این مبنای در رویکردی دو مرحله ای ابتدا با اصلاح شبکه معابر محلی مجاور ایستگاه حوزه نفوذ (دسترس پذیری) واقعی آن افزایش می یابد و سپس به صورت توأمان تراکم توسعه و فضاهای باز و عمومی در هر یک از این مناطق به نسبت معیارهای دسترس پذیری و تراکم وضع موجود افزایش می یابد. لی و همکاران تراکم و پهنه بندی یک ناحیه ایستگاهی (دهکده حمل و نقل عمومی) را با بیشینه سازی استفاده از سامانه حمل و نقل ریلی بهینه سازی کردند. پهنه های قابل تخصیص در این مدل بر مبنای ضوابط و مقررات کشور چین تنها شامل سه نوع تجاری، مسکونی و عمومی می شود. تعیین تراکم بهینه هر بلوک در این مدل از طریق تعیین کد پهنه بندی

- 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 همکاران 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 تصمیم‌مدل 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<sup>۱</sup>، عدم تشابه<sup>۲</sup> و تناسب میان مشاغل و واحدهای مسکونی<sup>۳</sup> 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 دریافته‌اند که کشش سفر با خودروی شخصی نسبت به اختلاط کاربری بین ۰.۲- تا ۱۱.۱- 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 دریافته‌اند 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 ۱۰ 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 به دست 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

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش مسئله تخصیص تراکم و کاربری بر مبنای اصول توسعه حمل‌ونقل عمومی محور 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 بر مبنای 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

$$\max_x Z_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^K x_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)} - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^K x_{ij} a_{ij} (1 - S_{ij}^{(k)}) \quad (1)$$

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 هراستگاه در نظر گرفته شده و همان طور که از رابطه شماره (۲) مشخص است، هدف کمینه‌سازی اختلاف نسبت مشاغل به واحدهای مسکونی از تعادل مطلوب است.

$$\min_{x,y} Z_2 = \sum_{k=1}^K \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \left( \frac{y_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)}}{FAPC(C)} - JHB(k) \right) \times \frac{x_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)}}{FAPC(R)} \right| \quad (2)$$

شد و هرگاه مقدار داخل پرانتز منفی گردد،  $\theta_k$  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.

$$\min_{x,y} Z_2 = \sum_{k=1}^K \left[ \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \left( \frac{y_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)}}{FAPC(C)} - JHB(k) \right) \times \frac{x_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)}}{FAPC(R)} \right) + 2\theta_k \right] \quad (3)$$

$$\left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \frac{y_{ij} a_{ij} S_{ij}^{(k)}}{FAPC(C)} - JHB(k) \right) + \theta_k \geq 0; \quad (4)$$

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.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \leq MaxP \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \geq MinP \quad (6)$$

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.

همان طور که در بند قبل اشاره شد، افزایش تراکم در نواحی مجاور ایستگاه‌ها در صورتی که با بهبود وضعیت اختلاط کاربری‌ها همراه شود، علاوه بر افزایش استفاده از سامانه حمل‌ونقل عمومی موجب افزایش کارایی 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

رابطه (۲) به دلیل 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،  $\theta_k$  برابر صفر خواهد

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. برای

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \leq MaxJ \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \geq MinJ \quad (8)$$

علاوه بر این 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

$$\sum_{j=1}^{N_i} \frac{x_{ij} a_{ij}}{FAPC^{(R)}} \leq \text{Max} N_i; \forall i = 1. \dots. M \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} \frac{x_{ij} a_{ij}}{FAPC^{(R)}} \geq \text{Min} N_i; \forall i = 1. \dots. M \quad (10)$$

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.

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

$$x_{ij} \leq w_{ij} \text{Max} R_{ij}^{(1)} + (1 - w_{ij}) \text{Max} R_{ij}^{(2)}; \forall i = 1. \dots. M, j = 1. \dots. N_i \quad (11)$$

$$y_{ij} \leq w_{ij} \text{Max} C_{ij}^{(1)} + (1 - w_{ij}) \text{Max} C_{ij}^{(2)}; \forall i = 1. \dots. M, j = 1. \dots. N_i \quad (12)$$

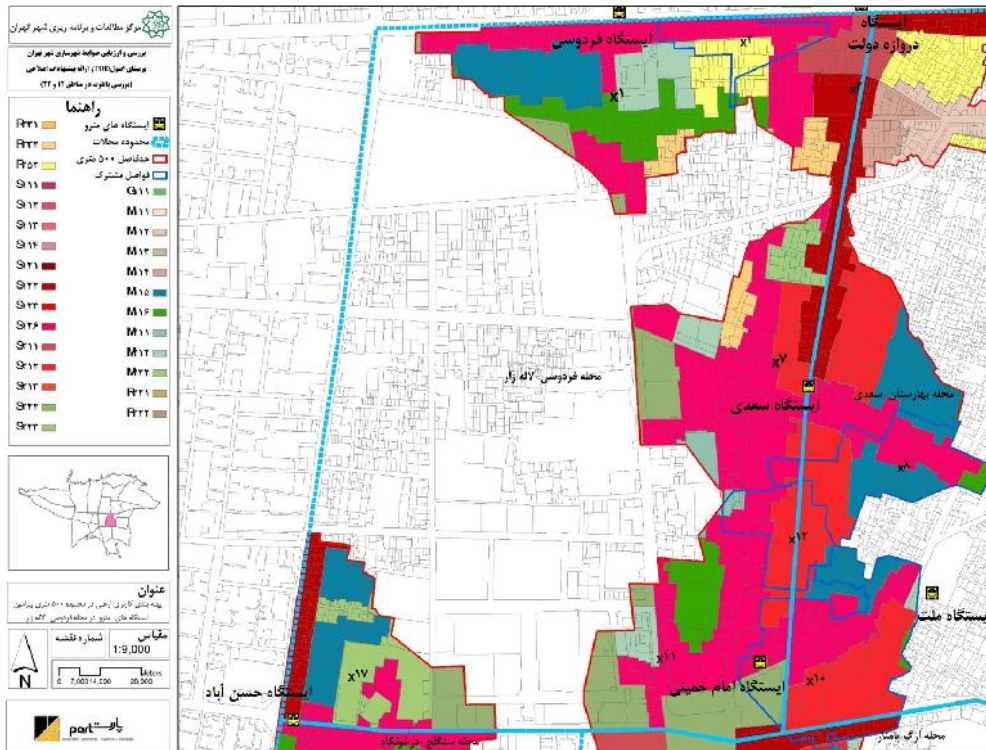
جدول شماره ۲: اندیس‌ها، متغیرها و پارامترهای مدل ریاضی

متغیرهای تصمیم		اندیس‌ها	
متوسط تراکم مسکونی تخصیص یافته به قطعه زام از محله i	$x_{ij}$	اندیس شماره محلات ( $i = 1. \dots. M$ )	$i$
متوسط تراکم فعالیت تخصیص یافته به قطعه زام از محله i	$y_{ij}$	اندیس شماره قطعات هر محله ( $j = 1. \dots. N_i$ )	$j$
متغیر صفر و یک (برابر ۱ در صورت انتخاب سناریوی نخست افزایش تراکم برای قطعه از و صفر در غیر این صورت)	$w_{ij}$	اندیس شماره ایستگاه حمل و نقل عمومی ( $k = 1. \dots. K$ )	$k$
پارامترها			
کف جمعیت پذیری محله i	$\text{Min} N_i$	تعداد محلات	$M$
سقف جمعیت پذیری محله i	$\text{Max} N_i$	تعداد قطعات محله i	$N_i$
حداکثر تراکم مسکونی پهنه قطعه زام از محله i تحت سناریوی ۱	$\text{Max} R_{ij}^{(1)}$	تعداد ایستگاه‌های حمل و نقل عمومی	$K$
حداکثر تراکم مشاغل پهنه قطعه زام از محله i تحت سناریوی ۱	$\text{Max} C_{ij}^{(1)}$	مساحت قابل مداخله قطعه زام محله i	$a_{ij}$
کف جمعیت پذیری منطقه براساس طرح جامع	$\text{Min} P$	مقدار این پارامتر در صورتی که قطعه زام از محله i در شعاع ۵۰۰ متری ایستگاه حمل و نقل عمومی k واقع شده باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$S_{ij}^{(k)}$
سقف جمعیت پذیری منطقه براساس طرح جامع	$\text{Max} P$	سرانه زیربنای مسکونی منطقه	$FAPC^{(R)}$
کف مشاغل قابل تخصیص به منطقه براساس طرح جامع	$\text{Min} J$	سرانه زیربنای فعالیت منطقه	$FAPC^{(C)}$
سقف جمعیت شاغل قابل تخصیص به منطقه براساس طرح جامع	$\text{Max} J$	نسبت شاغلان ساکن به ساکنان در شعاع ۵۰۰ متری ایستگاه k	$JHB^{(k)}$

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.

### 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



نقشه شماره ۱: نواحی ایستگاهی واقع در محله فردوسی به تفکیک پهنه بندی

که در آن  $X$  بردار متغیرهای تصمیم،  $f_i(X)$  تابع هدف نام و  $S$  فضای شدنی مسئله است. جواب‌های کارآی پارتویی در روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته 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 لکنیکوگرافیک 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 به دست 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 حاصل جمع تابع هدف باقی مانده با مضربی از مقادیر نرمال شده 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 به دست آمده مقادیر سمت راست محدودیت‌ها را اضافه

## 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 هدف و یافتن جواب‌های کارآی پارتویی<sup>۱</sup> استفاده شود. از جمله این رویکردها می‌توان به «ترکیب وزنی توابع هدف<sup>۲</sup>»، «برنامه‌ریزی آرمانی<sup>۳</sup>» و روش «محدودیت اپسیلون<sup>۴</sup>» و گونه‌های بهبود یافته و تعمیم یافته آنها اشاره کرد. در این پژوهش از رویکرد محدودیت اپسیلون تعمیم یافته<sup>۵</sup> به عنوان 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:

$$\max (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X))$$

st:

$$X \in S \quad (13)$$

- 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.

$$\begin{aligned} \max & [f_1(\mathbf{x}) + \varepsilon \times (\frac{S_1}{r_1} + \dots + \frac{S_p}{r_p})] \\ \text{st:} & \\ & f_i(\mathbf{x}) - S_i = e_i \quad \forall i \in 2, \dots, p \\ & \mathbf{x} \in S \end{aligned} \quad (14)$$

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

### ۲.۵: نمونه موردی

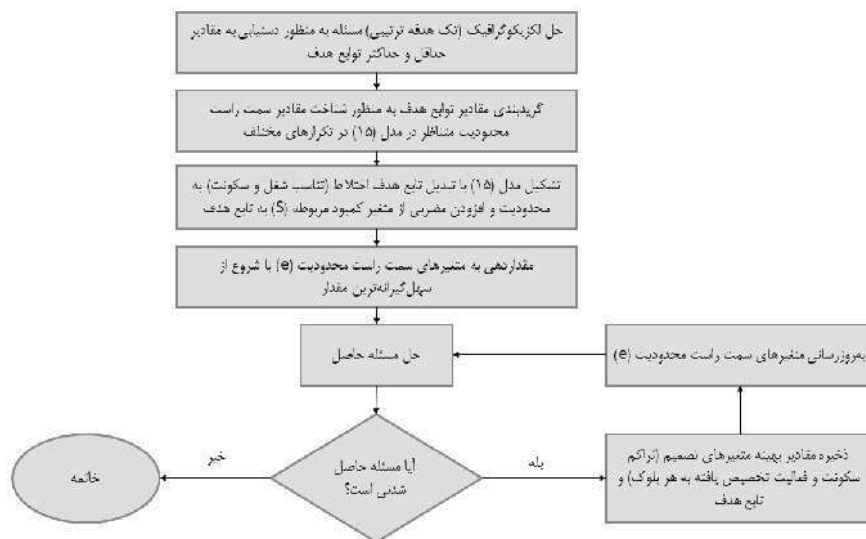
طرح جامع شهر تهران (۱۳۸۶)، پس از طرح جامع تهران (۱۳۴۸) و طرح ساماندهی تهران (۱۳۷۱)، سومین سند توسعه جامع شهر تهران است. در این طرح که با رویکردی ساختاری-راهبردی تهیه شده، آمده که «این طرح سندی راهبردی برای توسعه پایدار و هماهنگ کلانشهر تهران است. در این سند که با توجه به جایگاه و نقش جهانی، ملی و منطقه تهران، چشم‌انداز توسعه ترسیم شده و راهبردهای تحقق آن (زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی) در زمینه‌های 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 با وجود 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 عمومی محور، منطقه ۱۲ از منظر انطباق با این اصول جایگاه مناسبی در اختیار ندارد.

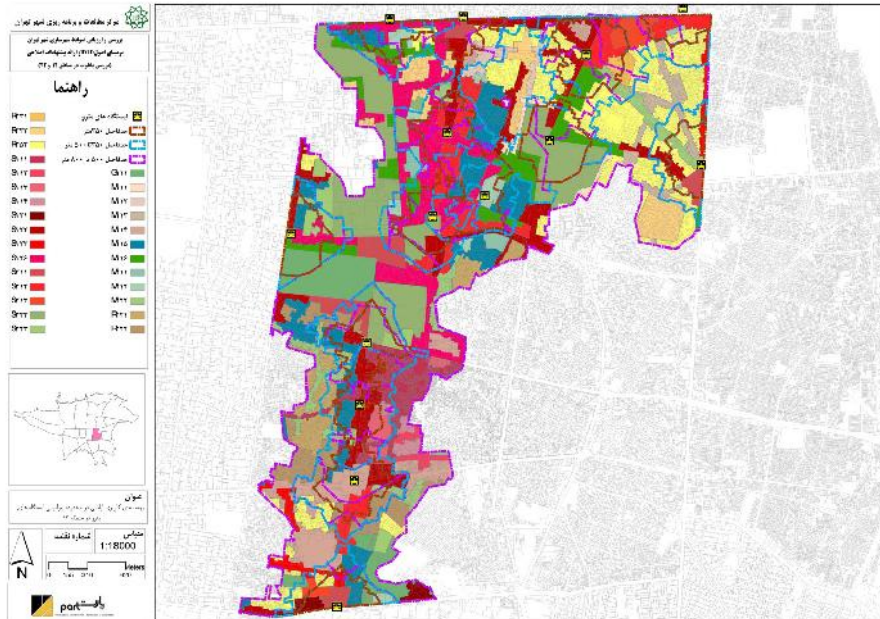
با توجه به پیشنهادهای طرح جامع در پهنه‌بندی منطقه ۱۲ شهر تهران (به عنوان نمونه مطالعاتی پژوهش حاضر) براساس حداکثر (۱۰۰ درصد) میزان تحقق‌پذیری تراکم‌های پیشنهادی و با در نظر گرفتن بعد خانوار به میزان (۱,۳,۲)، حداکثر میزان جمعیت‌پذیری منطقه ۱۲ براساس طرح جامع معادل ۴۰۱ هزار و ۹۹۰ نفر می‌باشد. بر همین اساس جمعیت‌پذیری بلوک‌ها و محلات نیز محاسبه شده که برای پرهیز از طولانی شدن مقاله از بیان آنها خودداری شده است.



نمودار شماره ۱: نمودار جریان حل مدل پیشنهادی

جدول شماره ۳: نسبت مساحت تحت پوشش سامانه مترو به کل مساحت منطقه

کل	مناطق											نسبت مساحت محدوده حول ایستگاه به کل مساحت منطقه										
	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲											
۰٫۱۸	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۲۶	۰٫۲۹	۰٫۰۱	۰٫۳۵	۰٫۳۶	۰٫۵۸	۰٫۷۹	۰٫۲۷	۰٫۲۱	۰٫۳۴	۰٫۴۸	۰٫۴۷	۰٫۱۷	۰٫۰۸	۰٫۱۵	۰٫۳۱	۰٫۷۰



نقشه شماره ۲: نواحی مجاور ایستگاه‌های مترو در منطقه ۱۲ تهران

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 هر یک از ۱۱ نقطه حاصل از حل مدل با این تقسیم‌بندی به دست آمد که نتایج آن در جدول شماره ۵ آمده است. نمودارهای شماره ۳ تا ۵ 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 ۴ 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

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

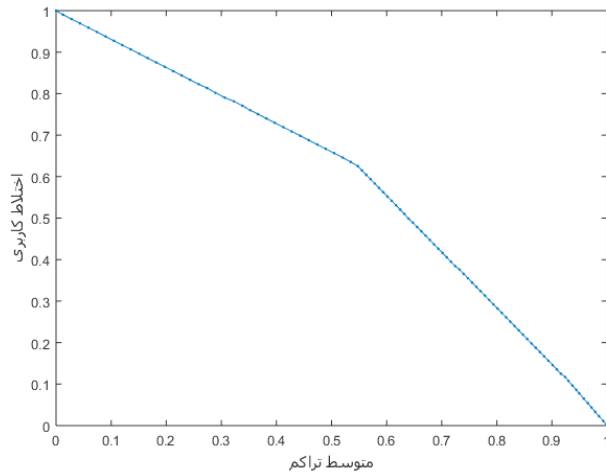
نمودار شماره ۲ مرز کارآی پارتویی حاصل از حل مسئله را به ازای توابع هدف ۱ و ۲ نشان می‌دهد. با توجه به تفاوت ابعاد توابع، در نمایش نمودار مقادیر نرمال‌سازی شده این توابع مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از آنجایی که یکی از دو تابع، از نوع بیشینه‌سازی و دیگری از نوع کمینه‌سازی است، از توابع متفاوتی (به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

$$r_i = \frac{x_i - \min_x x_i}{\max_x x_i - \min_x x_i} \quad (16)$$

$$r_i = \frac{\max_x x_i - x_i}{\max_x x_i - \min_x x_i} \quad (17)$$

تحلیل رگرسیون نتایج به دست آمده برای توابع هدف، نمایانگر کسش ۰٫۱۷- هدف اختلاط نسبت به هدف تراکم می‌باشد. به عبارت دیگر یک درصد افزایش در مقدار تابع هدف تراکم منجر به کاهش ۰٫۱۷ درصد در مقدار تابع هدف اختلاط خواهد شد. نتایج تحلیل رگرسیون در جدول شماره ۴ آمده است. همان طور که از جدول پیداست، 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،

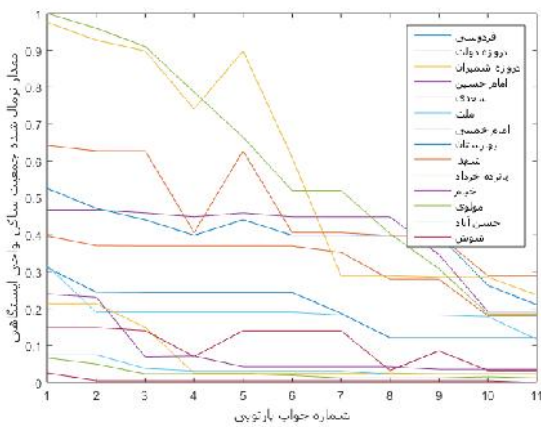




نمودار شماره ۲: مرز پارتویی حل مسئله براساس تابع هدف اول و دوم

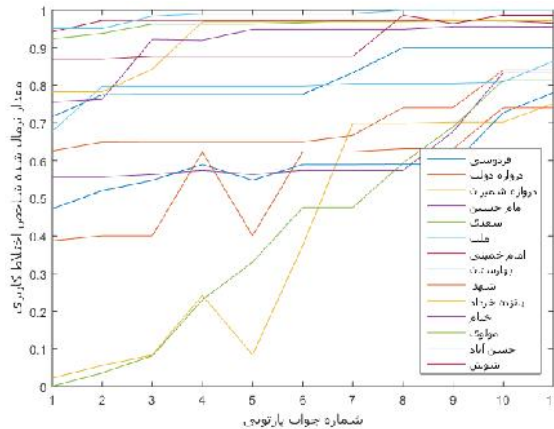
جدول شماره ۴: نتایج تحلیل رگرسیون نتایج

ضرایب متغیرها			ضرایب مدل		
متغیر مستقل (تراکم)	مقدار ضریب	آماره آمون	P مقدار	R <sup>2</sup> مقدار ضریب	P مقدار
متغیر مستقل (تراکم)	-۰,۰۱۷	-۰,۳۶۵۷,	۰,۰۰۰	۰,۶۷۱	۰,۰۰۰
عرض از مبدا	۰,۶۲۱	۱۰۴,۶	۰,۰۰۰		

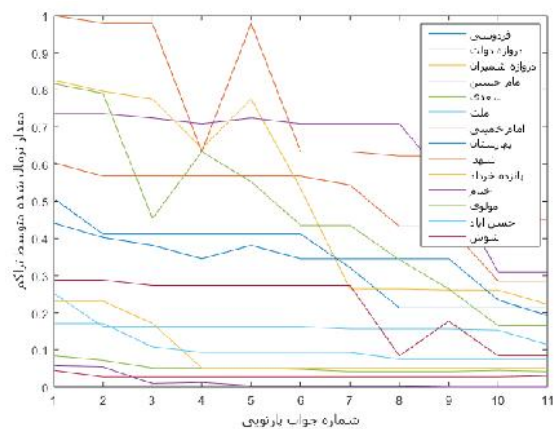


نمودار شماره ۴: تغییرات مقادیر نرمال شده جمعیت ساکن در نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربریها

برخی ایستگاه‌ها در ازای افزایش آن در برخی دیگر از ایستگاه‌ها هستیم. نکته دوم از وجوه متمایز رویکرد حاضر در برنامه‌ریزی نسبت به بهینه‌سازی انفرادی تراکم و اختلاط در هر یک از نواحی ایستگاهی است. به عبارت 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. به عنوان نمونه نمودار شماره ۱ نمایانگر یک صد پاسخ کارآی پارتویی مسئله می‌باشد. همان‌طور که از نمودار پیداست، این روش با افزایش دقت، قادر به تخمین تمامی نقاط واقع بر مرز پارتویی (گزینه‌های تصمیم‌گیری پیش روی مجموعه مدیریت شهری) است.



نمودار شماره ۵: تغییرات مقادیر نرمال شده نرخ اختلاط کاربریها نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربریها



نمودار شماره ۳: تغییرات مقادیر نرمال شده متوسط تراکم نواحی ایستگاهی به نسبت تشدید محدودیت اختلاط کاربریها

جدول شماره ۵۵: نتایج (پاسخ‌های بهینه پارتویی) حل مدل

ایستگاه شوش	ایستگاه حسن‌آباد	ایستگاه مولوی	ایستگاه خیام	۱۵ خرداد	میدان شهدا	بهارستان	ایستگاه امام خمینی	ایستگاه ملت	ایستگاه سعدی	ایستگاه امام حسین	ایستگاه دروازه شمیران	ایستگاه دروازه دولت	ایستگاه فردوسی	پاسخ
۶۴۰۴	۳۲۳۱	۴۲۷۸۸	۱۰۲۸۰	۹۱۶۶	۲۷۵۰۵	۲۲۵۱۰	۱۱۱۴	۱۳۵۴۰	۲۸۸۰	۲۰۰۱۵	۴۱۷۴۸	۱۷۰۰۳	۱۳۳۳۴	اختلاط
۱۰۵	۶۶	۲۸۱	۲۸	۸۶	۳۴۲	۱۵۶	۲۴	۹۳	۳۷	۲۵۴	۲۸۴	۲۱۰	۱۷۸	متوسط تراکم
۷۶۹۵	۴۲۴۵	۴۴۵۱۵	۱۲۵۳۴	۱۱۳۹۰	۲۸۱۳۶	۲۴۵۳۴	۴۶۲۹	۱۵۸۲۶	۵۴۲۰	۲۰۹۶۷	۴۳۵۸۳	۱۸۰۳۲	۱۴۱۹۴	جمعیت ساکن
۶۴۰۴	۳۲۳۱	۴۱۰۷۶	۹۹۱۶	۹۱۶۶	۲۶۸۵۹	۲۰۲۰۲	۲۵۲	۸۱۶۲	۲۱۷۲	۲۰۰۱۵	۳۹۶۹۱	۱۵۸۷۸	۱۰۴۹۹	اختلاط
۱۰۵	۶۶	۲۷۲	۲۷	۸۶	۳۳۵	۱۴۳	۱۸	۶۳	۳۳	۲۵۴	۲۷۴	۱۹۸	۱۴۶	متوسط تراکم
۷۶۹۵	۴۲۴۵	۴۳۰۰۰	۱۲۲۱۲	۱۱۳۹۰	۲۷۵۶۵	۲۲۴۹۲	۳۳۵۲	۱۰۷۴۶	۴۷۹۳	۲۰۹۶۷	۴۲۱۶۵	۱۷۰۳۶	۱۱۶۸۵	جمعیت ساکن
۶۰۳۷	۱۶۶۵	۳۸۹۵۴	۲۹۹۸	۶۴۲۳	۲۶۸۶۰	۷۱۸۸۸	۲۵۲	۸۱۶۲	۱۰۰۸	۱۹۶۶۴	۳۸۴۳۴	۱۵۸۴۳	۱۰۴۶۴	اختلاط
۱۰۰	۴۵	۱۶۰	۱۲	۶۶	۳۳۵	۱۳۶	۱۸	۶۳	۲۶	۲۵۰	۲۶۷	۱۹۸	۱۴۶	متوسط تراکم
۷۳۷۰	۲۸۵۹	۴۱۰۶۲	۵۴۸۰	۸۸۰۵	۲۷۵۶۵	۲۱۳۲۸	۳۳۵۲	۱۰۷۴۶	۳۷۳۷	۲۰۶۵۶	۴۰۹۸۰	۱۷۰۰۵	۱۱۶۵۴	جمعیت ساکن
۳۰۳۶	۱۳۶۲	۳۳۶۶۲	۳۰۸۴	۱۰۹۵	۱۷۴۰۸	۱۷۰۹۶	۲۵۲	۸۱۶۲	۱۰۰۸	۱۹۲۳۶	۸۳۱۷۱	۱۵۸۴۳	۱۰۴۶۴	اختلاط
۱۰۰	۴۰	۲۲۰	۱۳	۲۶	۲۲۰	۱۲۴	۱۸	۶۳	۲۶	۲۴۵	۲۲۳	۱۹۸	۱۴۶	متوسط تراکم
۷۳۷۰	۲۵۵۶	۳۴۷۷۱	۵۵۶۷	۳۴۷۷	۱۸۱۱۴	۱۹۵۳۷	۳۳۵۲	۱۰۷۴۶	۳۷۳۷	۲۰۲۲۸	۳۴۲۶۴	۱۷۰۰۵	۱۱۶۵۴	جمعیت ساکن
۶۰۳۷	۱۳۶۲	۲۸۴۴۶	۱۸۶۲	۱۰۹۵	۲۶۸۶۰	۱۸۸۸۷	۲۵۲	۸۱۶۲	۱۰۰۸	۱۹۶۶۴	۳۸۴۳۴	۱۵۸۴۳	۱۰۴۶۴	اختلاط
۱۰۰	۴۰	۱۹۳	۱۰	۲۶	۳۳۵	۱۳۶	۱۸	۶۳	۲۶	۲۵۰	۲۶۷	۱۹۸	۱۴۶	متوسط تراکم
۷۳۷۰	۲۵۵۶	۳۰۵۵۴	۴۲۴۴	۳۴۷۷	۲۷۵۶۵	۲۱۳۲۸	۳۳۵۲	۱۰۷۴۶	۳۷۳۷	۲۰۶۵۴	۴۰۹۸۰	۱۷۰۰۵	۱۱۶۵۴	جمعیت ساکن
۶۰۳۷	۱۳۶۲	۲۲۲۷۵	۱۸۶۱	۱۰۹۵	۱۷۴۰۹	۱۷۰۹۶	۲۵۲	۸۱۶۲	۸۵۳	۱۹۲۳۵	۲۶۱۲۲	۱۵۸۴۳	۱۰۴۶۴	اختلاط
۱۰۰	۴۰	۱۵۴	۱۰	۲۶	۲۲۰	۱۲۴	۱۸	۶۳	۲۵	۲۴۵	۱۸۷	۱۹۸	۱۴۶	متوسط تراکم
۷۳۷۰	۲۵۵۶	۲۴۳۸۳	۴۲۴۴	۳۴۷۷	۱۸۱۱۴	۱۹۵۳۷	۳۳۵۲	۱۰۷۴۶	۳۵۸۲	۲۰۲۲۸	۲۸۶۶۸	۱۷۰۰۵	۱۱۶۵۴	جمعیت ساکن
۶۰۳۷	۱۳۶۲	۲۲۲۷۵	۱۸۶۲	۱۰۹۵	۱۷۴۰۹	۱۷۰۹۶	۲۵۲	۷۸۴۸	۵۳۹	۱۹۲۳۶	۱۲۳۹۶	۱۵۱۱۰	۸۰۴۱	اختلاط
۱۰۰	۴۰	۱۵۴	۱۰	۲۶	۲۲۰	۱۲۴	۱۸	۶۱	۲۳	۲۴۵	۹۷	۱۹۰	۱۱۶	متوسط تراکم
۷۳۷۰	۲۵۵۶	۲۴۳۸۳	۴۲۴۴	۳۴۷۷	۱۸۱۱۴	۱۹۵۳۷	۳۳۵۲	۱۰۴۲۲	۳۳۶۸	۲۰۲۲۸	۱۴۹۴۲	۱۶۲۷۲	۹۲۳۱	جمعیت ساکن
۱۴۱۷	۹۷۲	۱۷۲۸۱	۱۸۶۲	۱۰۹۵	۱۷۰۵۲	۱۷۰۶۶	۲۵۲	۷۸۴۸	۵۳۹	۱۹۲۳۶	۱۲۳۹۶	۱۱۹۸۳	۵۲۱۹	اختلاط
۳۷	۳۴	۱۲۳	۱۰	۲۶	۲۱۶	۱۲۴	۱۸	۶۱	۲۳	۲۴۵	۹۷	۱۵۳	۸۰	متوسط تراکم
۲۷۵۰	۲۱۶۶	۱۹۳۸۹	۴۲۴۴	۳۴۷۷	۱۷۷۹۸	۱۹۵۱۰	۳۳۵۲	۱۰۴۲۲	۳۳۶۸	۲۰۲۲۸	۱۴۹۴۲	۱۳۱۴۶	۶۴۰۹	جمعیت ساکن
۳۶۹۰	۹۷۲	۱۳۲۰۳	۱۵۴۲	۱۰۰۸	۱۷۰۵۲	۱۷۰۶۶	۲۵۲	۷۸۴۸	۵۳۹	۱۴۸۵۴	۱۲۲۳۱	۱۱۹۸۴	۵۲۱۹	اختلاط
۶۸	۳۴	۹۷	۹	۲۶	۲۱۶	۱۲۴	۱۸	۶۱	۲۳	۱۹۲	۹۶	۱۵۳	۸۰	متوسط تراکم
۵۰۲۳	۲۱۶۶	۱۵۳۱۲	۴۰۲۴	۳۳۹۰	۱۷۷۹۸	۱۹۵۱۰	۳۳۵۲	۱۰۴۲۲	۳۳۶۸	۱۵۸۴۷	۱۴۷۷۷	۱۳۱۴۶	۶۴۰۹	جمعیت ساکن
۱۴۱۷	۹۷۲	۷۹۷۹	۱۵۴۲	۱۰۰۸	۱۲۳۹۹	۱۱۲۸۳	۲۵۲	۷۶۷۲	۶۹۴	۸۲۴۹	۱۲۲۳۱	۷۷۶۹	۵۲۱۹	اختلاط
۳۷	۳۴	۶۴	۹	۲۶	۱۶۰	۸۷	۱۸	۶۰	۲۴	۱۱۲	۹۶	۱۰۴	۸۰	متوسط تراکم
۲۷۵۰	۲۱۶۶	۱۰۰۸۷	۴۰۲۴	۳۳۹۰	۱۳۱۴۵	۱۳۷۲۸	۳۳۵۲	۱۰۲۵۶	۳۴۲۳	۹۲۴۱	۱۴۷۷۷	۸۹۳۱	۶۴۰۹	جمعیت ساکن
۱۴۱۷	۹۷۲	۷۹۷۹	۱۵۴۲	۱۰۰۸	۱۲۳۹۹	۹۰۳۰	۴۵	۵۰۲۶	۵۳۹	۸۲۴۹	۱۰۱۵۹	۷۷۶۹	۵۲۱۹	اختلاط
۳۷	۳۴	۶۴	۹	۲۶	۱۵۹	۷۳	۱۹	۴۷	۲۳	۱۱۲	۸۳	۱۰۴	۸۰	متوسط تراکم
۲۷۵۰	۲۱۶۶	۱۰۰۸۷	۴۰۳۴	۳۳۹۰	۱۳۱۴۵	۱۱۴۷۴	۳۶۲۷	۷۹۲۵	۳۳۶۸	۹۲۴۱	۱۲۷۰۵	۸۹۳۱	۶۴۰۹	جمعیت ساکن

#### ۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی

در این پژوهش مسئله تخصیص تراکم و کاربری با هدف پیشینه‌سازی انطباق با اصول توسعه حمل‌ونقل عمومی محور (TOD) - به‌طور خاص دو شاخص پیشینه‌سازی تراکم تخصیص یافته به نواحی مجاور ایستگاه‌ها و بهینه‌سازی اختلاط کاربری‌ها در این نواحی - 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 پیشینه‌سازی تفاضل تراکم تخصیص یافته به نواحی ایستگاهی از سایر نواحی و پیشینه‌سازی

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

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 Village 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 Densities 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  $\epsilon$ -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*

تراکم برابر ۱۰۱۷- است. به عبارت دیگر بهبود یک درصدی در شاخص تراکم مستلزم تضعیف ۱۰۱۷ 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 هراستگاه در مقیاس خرد و اهداف و راهبردهای مجموعه مدیریت شهری برای هر یک 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 مجزایه 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 مرتبط 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. علاوه بر این 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.

#### References:

- 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 ), 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.

۲۸

شماره بیست و هشتم

پاییز ۱۳۹۷

فصلنامه  
علمی-پژوهشی

مطالعات  
توسعه

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