# مدل‌سازی چهارمرحله‌ای تقاضای حمل‌ونقل برای شهرهای با جمعیت صد هزار تا سیصد هزار نفر

**مقاله علمی – پژوهشی**

علی محمدی، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
رضا محمدحسنی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rmhasany@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
صفحه ۱۹۴-۱۷۵

**چکیده**

***برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری، فرآیندی است که منجر به تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ها و سیاست‌های حمل‌ونقل می‌گردد. هدف این فرآیند تهیه‌ی اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری در مورد این است که سیستم حمل‌ونقل چه موقع، در کجا و به چه شکلی باید بهبود یابد. لازمه‌ی کسب این اطلاعات و اطمینان از نتیجه‌ی کار، طی کردن روند منطقی و سامانمند مربوط به برنامه‌ریزی است. به همین منظور در این پژوهش ابتدا به معرفی روش‌های مختلف مدیریت حمل‌ونقل و سیاست‌های مهم در حوزه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل درون‌شهری پرداخته شده است. پس‌ازآن، تلاش شده تا با ساخت یک برنامه کامپیوتری مدل‌سازی تقاضای حمل‌ونقل چهارمرحله‌ای به پیاده‌سازی مدل‌های ریاضی و آماری مورد استفاده در مراحل چهارگانه تولید و جذب سفر، توزیع سفر، تفکیک وسیله و تخصیص پرداخته شود. برای ساخت این برنامه از زبان $C++$ استفاده گردیده است. برنامه نوشته شده در این پژوهش سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل را قادر خواهد ساخت تا بتوانند پیامدهای مثبت و منفی طرح‌های خود را برای بهبود شرایط حمل‌ونقل پیش از اجرای طرح و صرف هزینه‌های گزاف مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهند.***

**واژه‌های کلیدی**: مدل چهارمرحله‌ای، تقاضای حمل‌ونقل، ارزیابی سیاست‌ها، تولید سفر، تخصیص سفر

## ۱-مقدمه

مسئله تراکم ترافیک و مدیریت صحیح آن در دهه‌های اخیر هزینه‌ی بسیاری را برای دولت‌ها به همراه داشته است. علاوه بر آن، مشکلات آلودگی هوا و آسیب‌های محیط‌زیستی، افزون بر مشکلات مستقیم تراکم ترافیک، لزوم برنامه‌ریزی صحیح و مطالعه بر روش‌های کاهش این معضل را اثبات کرده است. از سوی دیگر، تأثیر ترافیک شهری بر زندگی عادی و رفتار اجتماعی مردم قابل‌چشم‌پوشی نیست و سرمایه‌گذاری در این حیطه را توجیه‌پذیر می‌نماید. به‌طورکلی اهداف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را می‌توان شامل موارد زیر دانست: کاهش ترافیک و بهبود وضعیت رفت‌وآمد در سطح شهرها، کاهش هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل، کاهش میزان آسیب‌دیدگی خیابان‌ها و جاده‌ها، کاهش آلودگی صوتی، افزایش زیبایی‌های محیطی، افزایش استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی، افزایش سلامت خانواده‌ها به واسطه‌ی پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری و درنهایت دستیابی به توسعه‌ی پایدار [چوبچیان و همکاران، ۲۰۲۳]. اهمیت هر یک از اهداف بالا بر همگان آشکار است، اما اگر بخواهیم نگاهی دقیق‌تر بر وضعیت ترافیک شهرها بیندازیم، باید گفت که ترافیک شهری از دو جانب بر سلامت انسان‌ها اثرگذار خواهد بود. از سویی زمان ازدست‌رفته در حین مواجهه با تراکم ترافیک سبب آسیب روحی و استرس شده و از سوی دیگر آلودگی هوای ناشی از آن بر جسم آدمی اثرات مخرب می‌گذارد. نتایج

تحقیقات دراز مدتی که در مناطق مختلف جهان انجام گرفته نشانگر آن است که تنفس به مدت ۳۰ دقیقه در هوای آلوده‌ی ناشی از ترافیک شهری، باعث ایجاد تغییر در جریان الکتریسیته در مناطق مغز که مرتبط با رفتارها، تصمیم‌گیری‌ها و استرس هستند می‌شود. همچنین تحقیقی در هلند، اثر حضور ۹۰ روزه در شهرهای پر ترافیک را تغییراتی در ژن‌های افراد مسن دانسته است. از دیگر آثار مخرب ترافیک پر تراکم، اختلال در رشد طبیعی مغز، اختلال در بارداری، بروز اوتیسم در کودکان و تسهیل در پیری است [ایسکانیوز، ۱۳۹۶].

با توجه به آنچه گفته شد، اهمیت برنامه‌ریزی و آینده‌نگری برای حمل‌ونقل و کنترل ترافیک شهری نه تنها در شهرهای بزرگ که در شهرهای با جمعیت و حجم ترافیک کمتر نیز روشن است. در این پژوهش تمرکز بر مدیریت حمل‌ونقل در شهرهای با جمعیت متوسط (۱۰۰ تا ۳۰۰ هزار نفر) قرار گرفته است. از میان ۳۳۹ شهر ثبت شده در ایران، ۲۸ شهر دارای جمعیت بیش از ۳۰۰ هزار نفر هستند و برای برنامه‌ریزی در مورد آن‌ها نیاز به مطالعات جامع است که موردنظر این پژوهش نیست. طبق سرشماری انجام شده در سال ۱۳۹۵ توسط مرکز آمار ایران [درگاه ملی آمار، ۱۳۹۵]، ۷۰ شهر در محدوده‌ی جمعیت بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ هزار نفر قرار می‌گیرند که مورد توجه این پژوهش هستند.

## ۲- پیشینه تحقیق

در بررسی پیشینه ادبیات موضوع بایستی به دو موضوع پرداخته شود. اول اینکه روش‌های مدیریت حمل‌ونقل تاکنون و در دیگر کشورها به چه صورت بوده‌اند. دوم آنکه با استفاده از چه ابزاری می‌توان این سیاست‌ها را مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد، که هدف اصلی این مطالعه توسعه و بومی‌سازی این ابزارها برای اولین بار در ایران است. در ادامه این بخش این دو مبحث به تفصیل موردبررسی قرارگرفته‌اند.

### ۲-۱- روش‌های مدیریت حمل‌ونقل

به منظور کاهش مشکلات ناشی از ترافیک دو رویکرد عمده وجود دارد؛ رویکرد اول بهبود شبکه حمل‌ونقل از طریق احداث خیابان‌ها و خط‌های جدید است که نیازمند هزینه بالایی است و با افزایش زیرساخت‌های شبکه، تقاضا افزایش خواهد یافت. برای مثال با افزایش یک خط به یک بزرگراه، در مدت بسیار کوتاهی تقاضا در آن خیابان نیز افزایش خواهد یافته و تمام ظرفیت آن خط در جهت سرویس‌دهی به تقاضای اصلی خدمت نخواهد کرد. رویکرد دوم مدیریت تقاضای حمل‌ونقل است به شکلی که تعداد سفرها و خودروهای تک‌سرنشین کاهش یافته و استفاده از وسایل نقلیه عمومی و نرخ سرنشین به وسیله نقلیه افزایش یابد. از دیگر اهداف مدیریت تقاضای حمل‌ونقل می‌توان به تغییر زمان سفرها اشاره کرد. روش‌های بسیار متنوعی برای مدیریت حمل‌ونقل پیشنهاد شده است که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر خلاصه نمود:

*افزایش گزینه‌های حرکت*: یکی از روش‌هایی که می‌توان با استفاده از آن حجم ترافیک را کاهش داد افزایش طریقه‌های سفر[1] است. این روش‌ها می‌توانند شامل پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری، وسایل نقلیه عمومی، تاکسی، اشتراک خودرو[2] و غیره باشد. با فراهم کردن شرایط استفاده از این روش‌ها و بهبود کیفیت آن‌ها می‌توان افراد را به استفاده از آن‌ها ترغیب کرد که نتیجه‌ی آن کاهش استفاده از وسیله نقلیه شخصی خواهد شد [جان پوچر و همکاران، ۲۰۱۰].

روش‌های اقتصادی: روش‌های مدیریت تقاضای مبتنی بر معیارهای اقتصادی با استفاده از اعمال هزینه‌های مختلف، سعی در کاهش استفاده از خودروهای شخصی دارند. روش‌های اقتصادی اغلب مؤثرترین روش بین روش‌های مختلف مدیریت تقاضا هستند اما این روش‌ها معمولاً باعث ایجاد مقاومت بین راننده‌ها می‌شوند؛ بنابراین اعمال این روش‌ها از لحاظ سیاسی با مشکلاتی روبه‌رو است [برورداس، ۲۰۰۹]. یکی از این روش‌ها اعمال هزینه‌بر اساس زمان و مکان است. در این روش هزینه‌ها بر اساس زمان و مکان حضور خودروها اعمال می‌شوند و با استفاده از این روش می‌توان محدوده‌های با ترافیک سنگین را شناسایی کرده و در زمان‌های ازدحام عوارض مختلفی از وسیله‌های شخصی دریافت کرد. برای نمونه می‌توان در محدوده مرکزی شهر هزینه پارکینگ را افزایش داد و در زمان‌های اوج ترافیک از خودروهای شخصی که وارد محدوده مرکزی و پرترافیک شهر می‌شوند عوارض دریافت کرد. به‌طورکلی، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که روش‌های قیمت‌گذاری شبکه از مؤثرترین راهکارهای کاهش تراکم ترافیک و درنتیجه‌ی آن کاهش تولید آلاینده‌های هوا هستند ([حبیبیان و کرمانشاه، ۲۰۱۳]، [حبیبیان و همکاران، ۲۰۱۳]، [حبیبیان و همکاران، ۲۰۱٤] و [شاهنگیان و همکاران، ۲۰۱۲]). بر اساس این سیاست‌ها، استفاده‌کنندگان سواری شخصی جهت ورود به محدوده‌ای از شهر و یا تردد در برخی نواحی دارای تراکم ترافیک و یا در زمان‌هایی خاص، موظف به پرداخت وجوهی مشخص به عنوان عوارض هستند. منافع

حاصل از قیمت‌گذاری علاوه بر کاهش آلودگی هوا، آلودگی‌های صوتی، کاهش زمان‌های تلف شده، قابلیت پیش‌بینی زمان سفر، بهبود وضعیت حمل‌ونقل همگانی و کاهش میزان تصادفات را نیز شامل می‌شود.

مطالعات نشان می‌دهد که میزان کارایی قیمت‌گذاری استفاده از محدوده مرکزی شهر، وابسته به رفتار پاسخ‌دهندگان و میزان عوارض است. لارسن و اروستمو [۲۰۰۱] از مطالعاتی که با وضع عوارض روزانه همراه بود، در شهر برگن ۷ درصد کاهش ترافیک و در شهر اسلو درصد کمتری را در کاهش ترافیک گزارش کردند. همچنین در شهر دوبلین سیاست قیمت‌گذاری موجب کاهش ۲۲ درصدی حجم ترافیک ورودی به مرکز شهر در ساعات اوج گردید. بیزوس و روخا [۲۰۰۰] طی مطالعاتی در لندن در محدوده‌ی مرکز شهر، کاهش ۳۰ درصدی حجم ترافیک را گزارش کردند. در محدوده‌ی مرکزی شهر استکهلم نیز کاهش ۲۰ تا ۲۵ درصدی حجم ترافیک در شرایط اعمال این سیاست مشاهده شد [لارسن و اروستمو، ۲۰۰۱]. لیتمن [۲۰۰۳] با بررسی چهار روش قیمت‌گذاری شبکه برای کاهش ۱۰ درصدی سفرها در شهر کمبریج بیان می‌دارد که قیمت‌گذاری بر مبنای زمان اثرگذاری بیشتری دارد. حبیبیان و کرمانشاه [۲۰۱۳] به بررسی اثر پنج سیاست مدیریتی حمل‌ونقل بر احتمال استفاده از خودروی شخصی در محدوده مرکزی شهر تهران پرداختند و نشان دادند که تأثیر سیاست قیمت‌گذاری ورودی به محدوده مرکزی شهر از سایر سیاست‌های دفعی در کاهش استفاده از خودروی شخصی برای سفرهای کاری به مرکز شهر تهران مؤثرتر است.

*خط ویژه خودروهای با سرنشین بالا*: هدف از حمل‌ونقل شهری حمل‌ونقل مسافر است اما ترافیک با واحد وسیله نقلیه سنجیده می‌شود. تعداد زیاد وسایل نقلیه موجود در جریان ترافیک است که باعث بروز ازدحام در شبکه می‌شود. با تشویق خودروهای با تعداد سرنشین بالا می‌توان تعداد خودروها و در نتیجه ازدحام در شبکه را کاهش داد. یکی از روش‌هایی که می‌توان از طریق آن تعداد سرنشین‌های خودروها را افزایش داد، اختصاص دادن خط جداگانه برای خودروهای با تعداد سرنشین بالا است. در این روش می‌توان خط ویژه را به اتوبوس‌ها، ون‌ها، خودروهای با تعداد سرنشین بیشتر از دو نفر و یا به ترکیبی از آن‌ها اختصاص داد. لازم به ذکر است که این روش زمانی باعث بهبود کارایی شبکه خواهد شد که تعداد خودروهای واجد شرایط استفاده از آن به اندازه کافی زیاد باشد. در صورتی که تعداد این خودروها به قدری زیاد باشد که باعث ازدحام در خط شود می‌توان با سخت‌تر کردن شرایط استفاده از آن، تعداد خودروهای واجد شرایط را کاهش داد [سافیروا و همکاران، ۲۰۰۳]. مونیکا منندز و کارلوس داگانزو [۲۰۰۷] طی مطالعه‌ای در زمینه خطوط ویژه خودروهای دارای سرنشین بالا دریافتند که در صورت اجرای مناسب این روش، میزان مسافر–ساعت تأخیر کاهش خواهد یافت اما اجرای نادرست آن، شاهد اختلال در جریان ترافیک خواهیم بود.

*حذف و بازتوزیع سفرها*: در این روش برای کاهش ترافیک و مدیریت حمل‌ونقل، با تبدیل سفرها به صورت دورکاری باعث حذف سفر شده و یا با تغییر در زمان سفر، بازتوزیع سفر را ایجاد می‌نماییم. قسمت عمده ترافیک شهری مربوط به سفرهای کاری است. با توجه به این‌که این سفرها اجباری هستند، استراتژی‌های مختلف فقط قادر هستند وسیله این سفرها را تغییر دهند اما این سفرها حتماً انجام خواهند شد. در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی درزمینه‌ی کاهش سفرهای کاری انجام شده است. یکی از پیشنهادهای موفقی که طی این سال‌ها ارائه شده است دورکاری است [مافی و همکاران، ۲۰۲۳]. در این روش، وظایف هر فرد به او اختصاص داده می‌شود و فرد وظایف خود را در خانه خود (بدون نیاز به حضور در محل کار) انجام می‌دهد. در نتیجه تعداد سفرهای کاری به عنوان اصلی‌ترین سفرهای شهری کاهش می‌یابد [وو و واندبونا، ۲۰۰۷].

*توسعه‌ی هوشمند و کاربری*: کاربری زمین یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در رفتارهای حمل‌ونقلی مردم است [محمدی و کرمانشاه، ۲۰۱۹] و [محمدی و چوبچیان ، ۲۰۲۲]. کاربری‌های مسکونی تولید کننده سفر و کاربری‌های نظیر تجاری جاذب سفر هستند. یکی از عمده‌ترین دلایل ازدحام محدوده مرکزی شهر وجود کاربری‌های متعدد تجاری و اداری است که باعث جذب سفر به این مناطق می‌شود؛ بنابراین علی‌رغم بلندمدت بودن استراتژی‌های کاربری زمین، این روش‌ها می‌توانند بیشترین نقش را در کاهش ازدحام داشته باشند. گسترش حومه شهر نشان دهنده افزایش سفر در آینده نزدیک است. بهترین راه برای مقابله با چالش‌هایی نظیر این، استفاده از روش‌های مدیریت کاربری زمین و توسعه هوشمند شهری است.

*فناوری‌های نوظهور*: فنّاوری‌های نوین می‌توانند اثرات مهمی بر حمل‌ونقل داشته باشند. یکی از این فنّاوری‌های نوظهور خودروهای بدون راننده است [زو و همکاران، ۲۰۲۱]. این خودروها با استفاده از نقشه‌های بسیار دقیق راه‌ها و اطلاعات محلی که با استفاده از حسگرهای مختلف از محیط اطراف به دست می‌آورند، خودرو را هدایت می‌کنند. فنّاوری

دیگری که با همراهی خودروهای بدون راننده می‌تواند اثرات مثبتی بر کیفیت حمل‌ونقل داشته باشد، اتصال این خودروها است به نحوی که هر خودرو اطلاعات مکان، سرعت و نحوه حرکت سایر خودروها را دریافت کرده و در تصمیم‌گیری‌های خود مورد استفاده قرار می‌دهد. استفاده از این خودروها از جنبه‌های مختلفی می‌تواند باعث بهبود کیفیت ترافیک شود.

خودروهای بدون راننده و متصل می‌توانند با ایمنی بالایی از تقاطعات عبور کرده و ظرفیت تقاطع را بالا ببرند [ژو و اوکاسوری، ۲۰۱۵]. در صورت استفاده از خودروهای بدون راننده، جریان ترافیک می‌تواند شاهد کاهش اختلال و گلوگاه‌های ناشی از تصادفات باشد ([غیان و سین، ۲۰۱۶] و [طالب‌پور و محمسنی، ۲۰۱۶]). به دلیل مزایای ذکر شده، استفاده از خودروهای بدون راننده و متصل می‌تواند کارایی خیابان‌ها را حتی بیش از ۵۰ درصد افزایش دهد [واندر لان و سعدآبادی، ۲۰۱۷].

## ۲-۲- مدل تقاضای حمل‌ونقل چهارمرحله‌ای

روش مدل‌سازی چهار مرحله‌ای یا به‌عبارت‌دیگر فرایند برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری[۳] برای نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۵۰ پیشنهاد شد. در این رابطه مطالعه مهم میشل و راپکین [۱۹۵٤] نه‌تنها ارتباط میان سفرها و فعالیت‌ها (یا کاربری زمین) را مشخص کرد، بلکه ساختاری جامع را برای رفتار سفر مردم تعیین نمود. توسعه اولیه مدل چهار مرحله‌ای با استفاده از رایانه‌های پردازش مرکزی منجر به اولین کاربرد جامع این روش در مطالعات محدوده‌ی ترافیک دیترویت[٤] و مطالعات حمل‌ونقلی ناحیه‌ی شیکاگو[٥] شد [وینر، ۱۹۹۷]. تمرکز این مطالعات در دهه ۱۹۵۰ میلادی بر ارزیابی عملکرد ترافیکی احداث بزرگراه‌ها و دیگر زیرساخت‌های شهری بود.

در دهه ۱۹٦۰ میلادی قانون فدرال آمریکا نیاز به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری با سه ویژگی مداوم ، جامع و هماهنگ بودن رو الزامی دانست و توسعه این قوانین در دهه ۱۹۷۰ میلادی به لزوم توجه به مسائل زیست‌محیطی در فرایند مدل‌سازی پرداخت [هنشر و همکاران، ۲۰۰۰]. در طی این سال‌ها نرم‌افزارهای متعددی مانند ایمسان[٦]، امی[۷] و ترنسکد[۸] برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایند چهارمرحله‌ای تقاضای حمل‌ونقل توسعه یافته‌اند. اواخر دهه ۱۹۷۰ رویکرد جدیدی در پیش‌بینی تقاضای سفر تحت عنوان پاسخ سریع[۹] مطرح گردید ([سوسلاآو و همکاران، ۱۹۷۸] و [مارتین و مک‌گاکین، ۱۹۹۸]) که در نتیجه منجر به توسعه نسل جدیدی از مدل‌های تقاضای حمل‌ونقل تحت عنوان مدل‌های فعالیت-مبنا[۱۰] شد.

این نسل از مدل‌های تقاضای حمل‌ونقل به نسب مدل چهارمرحله‌ای با شبیه‌سازی زنجیره فعالیت‌ها و سفرهای روزانه افراد، قابلیت ارزیابی سیاست‌های بسیار متنوع‌تری را برای برنامه‌ریزان حمل‌ونقل ایجاد نموده است. استفاده از رویکرد مدل‌سازی فعالیت-مبنا نیازمند گرداوری حجم زیادی از اطلاعات متنوع است که فرایندی بسیار پرهزینه است. همین مسئله سبب شده تا امروزه در بسیاری از مطالعات ایران و دنیا از روش تحلیل تقاضای چهارمرحله‌ای استفاده شود.

همان‌طور که اشاره شد مدل‌های فعالیت-مبنا، امکانات بیشتری را نسبت به مدل‌های چهار مرحله‌ای در اختیار برنامه‌ریزان حمل‌ونقل قرار می‌دهند، به عنوان مثال، مدل‌سازی مسائل زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و قرار گرفتن در معرض آلودگی هوا. اگرچه مزایای آشکار این مدل‌ها برای اهداف زیست‌محیطی در حدود دو دهه پیش توسط شیفتن [۲۰۰۰] تشخیص داده شد، ولی برنامه‌های کاربردی برای ساخت این مدل‌ها در ادبیات مغفول مانده است. اخیراً از مدل‌های فعالیت-مبنا برای پیش‌بینی میزان آلایندگی [بکس و همکاران، ۱-۲۰۰۹] و کیفیت هوا استفاده شده است ([بکس و همکاران، ۲-۲۰۰۹] و [هاتزوپولو و میلار، ۲۰۱۰]). این روش با مدل‌سازی رفتار افراد به صورت غیرهمفزون امکان برآورد کلی بهتری از میزان انتشار گازهای آلاینده دارد ([دونت و همکاران، ۲۰۱۲] و [بکس و همکاران، ۳-۲۰۰۹]). بنابراین سیاست‌گذاران می‌توانند از مدل‌های فعالیت-مبنا برای تدوین استراتژی‌هایی استفاده کنند که با تغییر الگوهای فعالیت در زمان، میزان انتشار گازهای آلاینده را کاهش دهند ([پانیس و همکاران، ۱-۲۰۰۹] و [پانیس و همکاران، ۲-۲۰۰۹]).

در این پژوهش با بومی‌سازی نمونه اولیه‌ای از برنامه مدل‌سازی تقاضای حمل‌ونقل چهارمرحله‌ای، ابزاری مناسب برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت حمل‌ونقل شهری در اختیار برنامه‌ریزان این حوزه قرار گرفته است. بررسی ادبیات موضوع نشان داد که رویکرد مدل‌سازی چهارمرحله‌ای علاوه بر اینکه می‌تواند نقطه شروعی برای ساخت برنامه‌ها و مدل‌های پیشرفته‌تر باشد، با توجه به این مهم که نیازمند اطلاعاتی ساده‌تر و در دسترس است می‌تواند ابزاری کاربردی‌تر برای برنامه‌ریزان شهری باشد.

## ۳- روش پژوهش

مدل‌های حمل‌ونقل، یک نمایش سامانمند از حمل‌ونقل واقعی و کاربری زمین‌های موجود هستند. این مدل‌ها ابزارهای قدرتمندی برای نمایش تأثیر زیرساخت‌های حمل‌ونقلی و

چگونگی عملکرد سیستم در آینده بوده و راهنمای مناسبی برای توسعه و برنامه‌ریزی حمل‌ونقلی شهری در اختیار ما قرار می‌دهند. در این مدل‌ها از روابط ریاضی برای نمایش تصمیمات پیچیده‌ی مردم در مورد سفر و همچنین پیش‌بینی تقاضای آینده استفاده شده است. به‌طورکلی این مدل‌ها شامل مدل‌های تقاضا، مدل‌های تخصیص جاده‌ای و مدل‌های تخصیص همگانی می‌شوند [کانسیل، ۲۰۱۸].

پیش‌بینی حمل‌ونقل به معنای تخمین تعداد وسایل نقلیه یا افراد استفاده‌کننده از یک شبکه‌ی حمل‌ونقل در آینده است. این پیش‌بینی با جمع‌آوری اطلاعاتی مربوط به ترافیک کنونی شامل جمعیت، اشتغال، نرخ سفر، هزینه‌ی سفر و غیره آغاز می‌شود تا به کمک آن یک مدل تقاضا برای شرایط موجود به دست آمده و با پیش‌بینی اطلاعات جمع‌آوری شده برای آینده، تقاضای آینده پیش‌بینی گردد [ویکی‌پدیا، ۲۰۱۹]. چهار مرحله‌ی اصلی در روش پیش‌بینی حمل‌ونقل به طور خلاصه به شرح زیر است.

*تولید سفر*: در این مرحله تعداد سفرهای هر مبدأ یا هر مقصد برای هر ناحیه به همراه هدف سفر که تابعی از کاربری زمین، اطلاعات آمارگیری خانوارها و سایر پارامترهای اجتماعی- اقتصادی است، محاسبه می‌گردد. آنچه در مرحله‌ی اول مورد توجه است، به دست آوردن تعداد سفرهای ایجاد شده در هر ناحیه به کمک اطلاعات جمع‌آوری شده برای کاربری زمین است. این سفرها، هم سفرهای تولیدی و هم سفرهای جذبی را دربر می‌گیرند. سفرهای تولید شده در نواحی مختلف بسیار به کاربری مسکونی این نواحی بستگی دارد و همین‌طور برای سفرهای جذبی نیز کاربری‌های تجاری و اداری و ... تأثیرگذار خواهند بود. ازاین‌رو لازم است به کمک مدلی، تعداد سفرهای هر ناحیه را به عنوان متغیری وابسته به یک یا چند متغیر کاربری زمین به دست آوریم. برای این کار عموماً برای این مرحله از روش رگرسیون خطی استفاده می‌شود.

*توزیع سفر*: مرحله‌ی دوم این روش به تهیه‌ی ماتریس مبدأ- مقصدها می‌پردازد و در واقع اتصال‌دهنده‌ی مبدأها به مقصدهاست. در این مرحله از تحلیل تقاضای سفر، سعی در پیش‌بینی ماتریس توزیع سفر برای آینده داشته و هدف تعیین تعداد سفر هر مبدأ-مقصد برای آینده است. این مرحله معمولاً با مدل جاذبه صورت می‌گیرد و روش‌های قدیمی مورد استفاده در این مرحله شامل روش فراتر[11] یا فرنس[12] می‌شود.

*انتخاب وسیله*: در این مرحله سهم سفر بین هر مبدأ-مقصد که با یک وسیله‌ی مشخص انجام می‌شود. تعیین سهم وسیله به‌طورکلی به دو صورت انجام می‌گیرد؛ پس از مرحله‌ی توزیع سفر و قبل از آن. مدل‌هایی که سهم وسیله را قبل از مرحله‌ی توزیع سفر تعیین می‌کنند به مدل‌های سهم وسیله‌ی «انتهای سفر» و حالت دیگر را مدل‌های «تبادل سفر» می‌نامند. این مرحله معمولاً به روش لوجیت حل می‌شود.

*تخصیص سفر*: سفرهای محاسبه شده برای هر مبدأ-مقصد و وسیله در این مرحله به مسیرهای ممکن بین هر مبدأ-مقصد تخصیص داده می‌شود. ازاین‌رو لازم است در ابتدا اجزای شبکه‌ی حمل‌ونقل خیابانی و شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی معرفی شوند. هر شبکه‌ی حمل‌ونقل خیابانی از دو نوع اجزای فیزیکی تشکیل شده است؛ مجموعه‌ای از گره‌ها و مجموعه‌ای از کمان‌ها که این گره‌ها را به هم وصل می‌کند. هر کمان مقاومتی در برابر جریان دارد که این مقاومت می‌تواند زمان سفر، هزینه‌ی سفر، عدم مطلوبیت یا سایر معیارها باشد. هر مسیر نیز عبارت است از توالی‌ای از کمان‌های جهت‌دار که از یک گره شروع و به گره دیگر ختم می‌شود. معمولاً هر زوج مبدأ- مقصد در شبکه‌های واقعی با تعداد زیادی از مسیرها به یکدیگر متصل هستند. این تخصیص عموماً براساس قانون واردراپ[13] و در نتیجه‌ی تعادل استفاده‌کننده است.

بدون شک یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در فرآیند مدل‌سازی، به دست آوردن اطلاعات اولیه قابل اطمینان است. علاوه بر دقت، لازم است که این اطلاعات به روز باشند. در جمع‌آوری چنین اطلاعاتی آمارگیری به عنوان بهترین گزینه مطرح خواهد بود. مطالعات جامع حمل‌ونقل اطلاعات نسبتاً کاملی در مورد کاربری نواحی و همچنین اطلاعات ترافیکی فراهم نموده است. با توجه به این که مسئله‌ی این پژوهش مربوط به شهرهای با جمعیت متوسط است، اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی حمل‌ونقل شهرها از مطالعات طرح ساماندهی حمل‌ونقل شهری تهیه می‌گردد. در شکل (۱) به طور خلاصه ورودی‌های مدل این پژوهش، روش حل و خروجی‌های قابل‌انتظار آن در یک فلوچارت برای سادگی بیشتر فراهم شده است. این برنامه در مرحله اول تمامی اطلاعات ورودی شامل اطلاعات تقاضای سفر، عرضه و اطلاعات ترافیکی را دریافت می‌نماید. پس‌ازآن با انجام محاسبات پیچیده ریاضی و آماری، تعداد سفرهای انجام شده از هر کمان با هر نوع وسیله در ساعت اوج را تعیین می‌کند. در نتیجه پارامترهای خروجی شبکه شامل مصرف سوخت، نسبت تقاضا به ظرفیت، زمان سفر کل و وسیله کیلومتر طی شده تعیین می‌گردند. این نرم‌افزار ابزار مناسب برای سنجش پیامدهای طرح‌های پیشنهادی را در اختیار برنامه‌ریزان حمل‌ونقل قرار خواهد داد.

## ٤- برنامه کامپیوتری نوشته شده

فرآیند مدل‌سازی تقاضای حمل‌ونقل و همچنین پیاده‌سازی سیاست‌های مورد نظر در مدل و بررسی کارایی این سیاست‌ها، عملی است که در برنامه‌ریزی تقاضای حمل‌ونقل صورت می‌پذیرد. براساس اطلاعات ورودی که عمدتاً حاصل از آمارگیری است، مدل‌سازی تقاضا به روش چهار مرحله‌ای انجام می‌گیرد و پس‌ازآن، با پیش‌بینی تقاضای آینده می‌توان عملکرد سیاست‌های موردنظر را ارزیابی نمود. لازمه‌ی این مدل‌سازی استفاده از یک برنامه‌ی کامپیوتری است.

این برنامه در محیط Visual Studio 2013 به زبان C++ نوشته شده است. این نرم‌افزار به دو بخش کلی تقسیم می‌گردد. در ابتدا با استفاده از اطلاعات شبکه در وضعیت موجود، مدل‌های مربوط به چهار مرحله کالیبره شده و با استفاده از اطلاعات اولیه برای آینده، مشخصات شبکه برای آینده پیش‌بینی می‌گردد. در بخش دیگر، سیاست‌های مورد نظر کاربر به نرم‌افزار وارد و نتیجه‌ی اجرای این سیاست‌ها در آینده‌ی شبکه ارزیابی می‌شود. شکل (۲) تصویر صفحه اصلی نرم‌افزار را نمایش می‌دهد. دو بخش یاد شده در شکل قابل مشاهده هستند و مراحل مختلف مدل‌سازی به همراه توضیحات اجرا در آن یاد شده است.

در این بخش از برنامه، اطلاعات هر یک از چهار مرحله باید به صورتی که در راهنماهای برنامه گفته شده است توسط کاربر وارد گردد. این اطلاعات ورودی در ابتدا لازم است که برای بخش ارزیابی وضعیت موجود وارد شده و سپس متناسب با استراتژی موردنظر تغییر یابد. شکل (۳) پنجره مربوط به وارد کردن اطلاعات گام اول را نمایش می‌دهد. در این مرحله لازم است کاربر ابتدا براساس راهنمای تعیین استراتژی، شماره استراتژی را وارد نموده و پس‌ازآن مطابق با راهنما، اطلاعات گام اول را در فایل‌های مشخص شده ذخیره نماید. این چهار استراتژی عبارتند از:

۱) استفاده از اطلاعات جمعیت و اشتغال و مدل‌سازی با روش رگرسیون خطی،

۲) ورود ضرایب مدل‌ها به صورت دستی توسط کاربر،

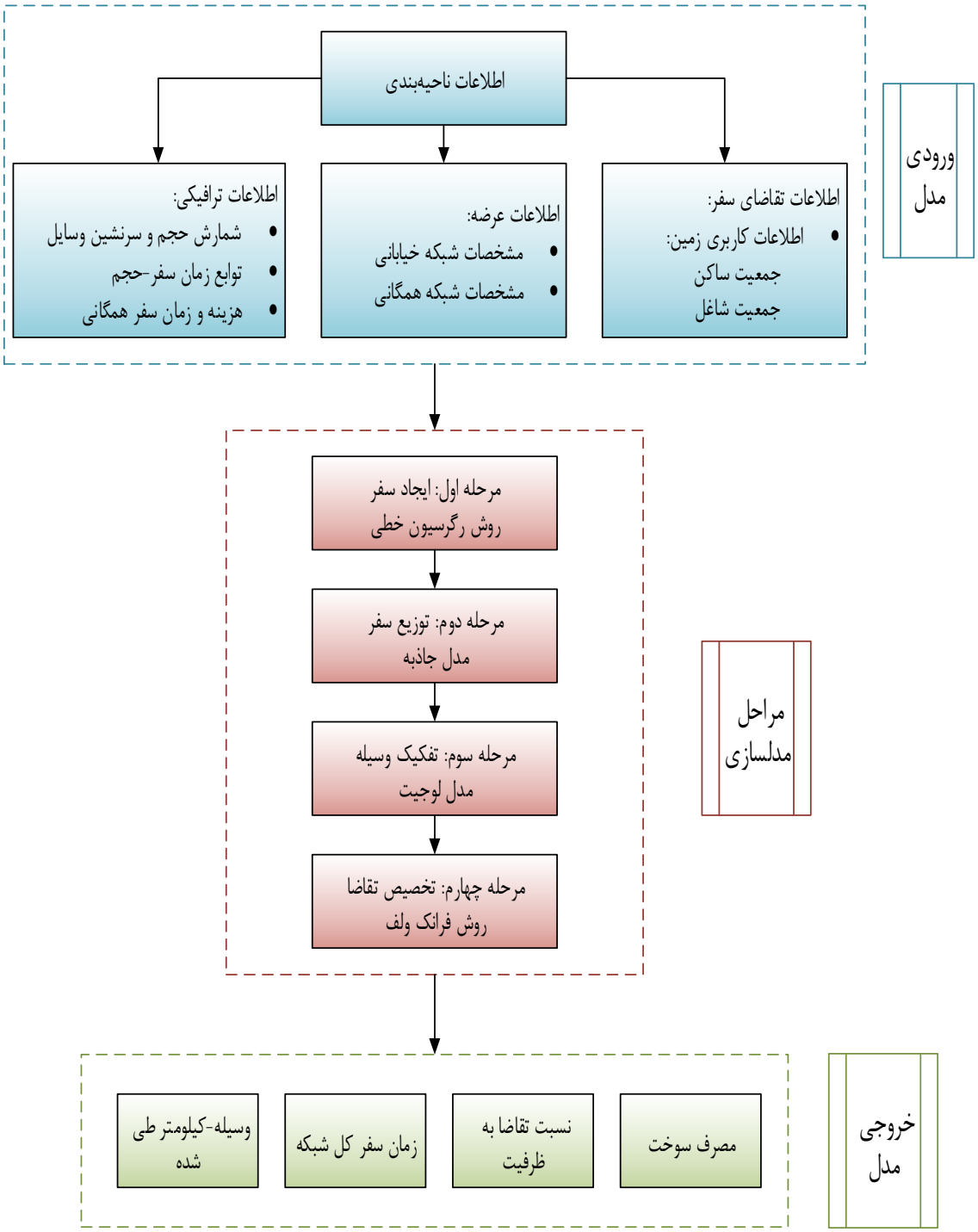
۳) استفاده از ضرایب به دست آمده برای شهرهای دیگر،

٤) بهره‌گیری از روش نرخ سفرسازی کاربری‌ها.

پس از ذخیره اطلاعات گام اول، به مرحله‌ی بعد رفته و اطلاعات گام دوم را ذخیره می‌نماییم. شکل (٤) پنجره‌ی مربوط به اطلاعات گام دوم در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. این اطلاعات شامل ماتریس تقاضا و زمان سفر در شبکه‌ی کنونی است. در مرحله‌ی بعد، ورودی‌های مربوط به گام سوم ذخیره می‌گردد. این اطلاعات شامل ویژگی‌های دو نوع وسیله‌ی شخصی و همگانی در شبکه‌ی کنونی و همچنین هزینه‌ی استفاده از این دو نوع وسیله در آینده است. در شکل (۵) پنجره‌ی مربوط به این بخش در نرم‌افزار قابل مشاهده است.

گام چهارم مربوط به تخصیص وسایل در شبکه است که با توجه به اینکه برای شبکه‌های محدود به شهرهای با جمعیت متوسط، شبکه همگانی دارای خطوط جداگانه‌ای نیست و تنها اطلاعات شبکه‌ی خیابانی لازم است. این اطلاعات توسط کاربر مطابق با راهنما در فایل موردنظر ذخیره می‌گردد. شکل (٦) پنجره‌ی مربوط به این بخش را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

پس‌ازاینکه اطلاعات ورودی توسط کاربر وارد و ثبت شد، دکمه اجرای برنامه زده شده و پس از چند ثانیه نتایج آماده‌ی نمایش هستند. با زدن دکمه مشاهده‌ی نتایج می‌توان این اطلاعات را مشاهده نمود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، خروجی‌ها شامل اطلاعاتی در مورد کمان‌های شبکه و اطلاعات کلی شبکه است. اطلاعات کمان‌های شبکه شامل جریان هر کمان، زمان سفر هر کمان و نسبت جریان به ظرفیت کمان است که در یک فایل متنی قابل مشاهده هستند. اطلاعات کلی شبکه مقادیر زمان سفر کل شبکه، وسیله-کیلومتر طی شده و میزان مصرف سوخت کل شبکه را نمایش می‌دهد. علاوه بر آن، نسبت جریان شبکه همگانی به ظرفیت آن نیز محاسبه می‌گردد. شکل (۷) شمای کلی صفحه نتایج را نشان می‌دهد.




**شکل ۱. فلوچارت خلاصه‌ی فرایند مدل‌سازی در این پژوهش**

**شکل ۲. صفحه اصلی نرم‌افزار**

**شکل ۳. پنجره‌ی اطلاعات ورودی گام اول**

شکل ٤. پنجره‌ی اطلاعات ورودی گام دوم

شکل ۵. پنجره‌ی اطلاعات ورودی گام سوم

شکل ٦. پنجره اطلاعات ورودی گام چهارم

**شکل ۷. پنجره‌ی مشاهده‌ی نتایج**

## ۵- سیاست‌های مورد بررسی

یکی از اصلی‌ترین اهداف مدل‌سازی تقاضا و این پژوهش، ارزیابی سیاست‌های پیشنهادی پیش از اجرا و تصمیم‌گیری منطقی برای انتخاب آن‌ها است. تصمیم‌گیری بدون انجام این مرحله ممکن است ضررهای قابل‌توجهی برای دولت و همچنین عملکرد ترافیکی شبکه داشته باشد. در ادامه لیست سیاست‌های ممکن در این پژوهش و نحوه‌ی اعمال آن‌ها در برنامه شرح داده شده است.

### ۵-۱- تغییر کاربری

در مواردی برای بهبود وضعیت شبکه، یک راهکار پیشنهادی تغییر کاربری برخی نواحی به سمتی است که از تجمع ترافیکی جلوگیری کند. برای اعمال این سیاست در برنامه، می‌توان متناسب با استراتژی انتخابی از سوی کاربر، اطلاعات کاربری برای آینده را به نحوی تغییر داد و وارد مدل نمود که عملکرد این سیاست در بهبود وضعیت شبکه قابل مشاهده و ارزیابی باشد.

### ۵-۲- تغییر سرفاصله‌ی زمانی

سیاست دیگر مورد بررسی در این پژوهش تغییر در ظرفیت ناوگان همگانی است. با مدل‌سازی وضعیت موجود می‌توان میزان استفاده از ظرفیت همگانی در آینده را افزایش یا کاهش داد. این تغییر در ظرفیت به صورت تغییر در سرفاصله‌ی زمانی اتوبوس‌ها اعمال می‌گردد. در صورتی که نسبت استفاده از ظرفیت عدد کمی باشد می‌توان سرفاصله را افزایش داد و بنابراین تعداد کمتری اتوبوس مورد نیاز است. در صورت بالا بودن این نسبت با کاهش سرفاصله تعداد ناوگان را افزایش می‌دهیم. لازم به ذکر است ظرفیت نهایی هر اتوبوس واحد ۱/۵ برابر تعداد صندلی‌ها درنظرگرفته شده است.

### ۵-۳- اضافه کردن خط همگانی

پس از بررسی وضعیت موجود، برای برخی از مبدأ-مقصدها ممکن است ایجاد خط جدید وسیله‌ی همگانی قابل توجیه باشد. این سیاست به منظور کاهش تقاضای وسیله‌ی شخصی و کاهش تراکم صورت می‌گیرد. برای اعمال این سیاست کافی است مشخصات خط همگانی جدید شامل هزینه‌ی سفر و سرفاصله‌ی زمانی آن توسط کاربر وارد گردد تا سهم خط جدید از تقاضا تعیین گردد. لازم به ذکر است در این مرحله فرض شده است میزان حساسیت استفاده‌کنندگان به هزینه و زمان سفر وسیله‌های مختلف که در واقع همان ضرایب مدل مطلوبیت هستند ثابت است.

### ۵-٤- قیمت‌گذاری وسیله‌ی شخصی

هزینه‌ی سفر برای وسیله‌ی شخصی و همگانی از سوی کاربر در برنامه وارد می‌شود. این هزینه برای وسیله‌ی شخصی می‌تواند هزینه‌ی سوخت و همچنین پارکینگ باشد؛ بنابراین تصمیم‌گیران می‌توانند با تغییر در هزینه‌ی پارکینگ تقاضای وسیله‌ی شخصی را تغییر دهند. به منظور اعمال این سیاست در برنامه، کافی است کاربر هزینه‌ی وسیله‌ی شخصی برای آینده را در ورودی‌ها تغییر دهد.

### ۵-۵- قیمت‌گذاری بلیت اتوبوس

این سیاست نیز مانند سیاست گفته شده در بخش قبل سعی در تغییر سهم تقاضای وسایل مختلف با تغییر مطلوبیت آن‌ها دارد. در این سیاست با تغییر هزینه سفر در آینده برای وسیله‌ی همگانی توسط کاربر، می‌توان مطلوبیت این وسیله را افزایش یا کاهش داد.

### ۵-٦- یکطرفه‌سازی و پیاده راه

در برخی موارد پس از ارزیابی وضعیت موجود، کارشناسان سیاست یکطرفه‌سازی یک یا چند کمان مشخص را پیشنهاد می‌دهند. در این برنامه قابلیت اعمال این تغییر مهیا شده است. بدین صورت که در اطلاعات ورودی توسط کاربر تغییری در مشخصات کمان‌های درگیر صورت می‌گیرد و یکطرفه‌سازی اعمال می‌گردد. این تغییر به صورت افزودن زمان سفر کمان جهت ممنوع و افزایش ظرفیت کمان جهت مقابل اعمال می‌شود. از سوی دیگر افزودن پیاده‌راه نیز مفهومی مشابه با یکطرفه‌سازی دارد و حذف غیر فیزیکی کمان جهت مقابل انجام می‌شود.

### ۵-۷- تعریض راه

یکی از گزینه‌های پیشنهادی برای کاهش حجم ترافیک تعریض راه در بخش‌هایی است که از نظر محیطی امکان آن وجود دارد. در این سیاست در واقع ظرفیت کمان‌ها دست‌خوش تغییر قرار می‌گیرد. از این‌رو کافی است برای اعمال این سیاست در ورودی‌های مربوط به اطلاعات شبکه خیابانی ظرفیت کمان‌های موردنظر را تغییر داد.

## ٦- ارزیابی عملکرد برنامه

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار و ارزیابی عملکرد آن، مثال کاملی مورد بررسی واقع شده است که مربوط به اطلاعات شبکه شهر رامشیر واقع در استان خوزستان است. شهرستان رامشیر از شمال با شهرستان اهواز، از جنوب با شهرستان امیدیه، از شرق با شهرستان رامهرمز و از غرب با شهرستان بندر ماهشهر مجاورت دارد که در تاریخ ۱۳ دی ۱۳۸٤ از شهرستان رامهرمز جدا و به شهرستان جدیدی تبدیل شد. شهر رامشیر مرکز این شهرستان با ۵/۹ کیلومترمربع مساحت در ۳۵ کیلومتری بندر ماهشهر و ۱۰۸ کیلومتری جنوب شرق اهواز، از نظر جغرافیایی بین ۳۰ درجه و ۳۹ دقیقه‌ی پهنای شمالی و ٤۸ درجه و ٤۰ دقیقه‌ی درازای شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. جمعیت این شهرستان بر اساس آخرین سرشماری سال ۱۳۹۵ در مجموع ٥٤۰۰٤ نفر بوده که ۲۷۱۰٤ نفر (معادل ۵۰/۲ درصد) در شهر رامشیر و ۲٦۹۰۰ نفر (معادل ٤۹/۸ درصد) نیز در نقاط روستایی ساکن می‌باشند. در این مثال سعی شده است به کمک اطلاعات اولیه در مورد شبکه‌ی مورد بررسی به صورت فرضی اعداد منطقی برای ورودی‌های مورد درنظرگرفته شود و این اعداد بر شبکه‌ی خیابانی شهر رامشیر اعمال گردد. نقشه این شهرستان در شکل (۸- الف) آمده است.

به منظور مدل‌سازی شبکه حمل‌ونقلی این شهرستان بایستی در مرحله اول شهر را به چندین ناحیه ترافیکی تقسیم نمود. به همین منظور با توجه به ویژگی‌هایی مانند یکسان بودن کاربری‌های، همگن بودن جمعیت و عدم عبور مرز نواحی از روی شبکه معابر این شهر به ۸ ناحیه ترافیکی تقسیم شده است. این نواحی در شکل (۸-ب) نشان داده شده است. در مرحله بعد بایستی شبکه حمل‌ونقلی شهر شبیه‌سازی گردد. در این راستا مطابق شکل (۸-ج) گره‌های اصلی شبکه و کمان‌های شبکه ترسیم گردیده‌اند. این شبکه دارای ۳۱ گره که از این میان گره‌های ۱ تا ۸ به عنوان مراکز ناحیه در نظر گرفته شده‌اند. مراکز ناحیه به گره‌هایی اتلاق می‌شود که تمامی سفرهای مربوط به آن ناحیه ترافیکی از/به آنجا شروع/ختم می‌شود. به علاوه دو مسیر خطوط همگانی برای این شهر در نظر گرفته شده که مبدأ و مقصد این خطوط در شکل (۸-ج) ارائه شده است. سپس تمامی کمان‌های شبکه شماره‌گذاری شده و نوع آن‌ها تعیین گردیده است. این شبکه دارای ۸٤ کمان بوده که به دو نوع شریانی درجه یک و شریانی درجه دو تقسیم شده‌اند. در شکل (۸-د) خطوطی که با خط قرمز نشان داده

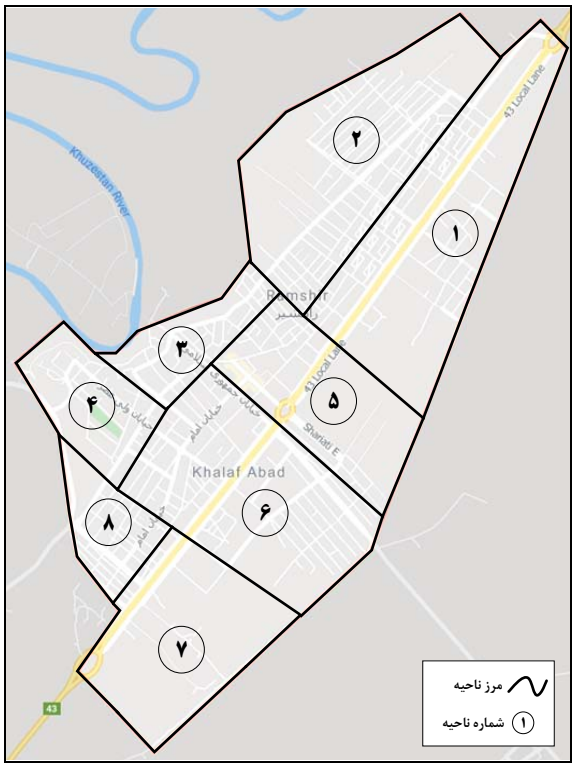
شده است از نوع راه شریانی درجه یک با ظرفیت هر خط ۲۱۰ وسیله در ساعت و خطوط با رنگ آبی از نوع راه شریانی درجه ۲ با ظرفیت هر خط درجه دو ۱۸۰ وسیله در ساعت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تمامی کمان‌های شبکه دوطرفه بوده و هر خط نمایش داده شده در نقشه شامل دو کمان رفت‌وبرگشت است.

در مرحله بعد نیاز بوده تا تمامی اطلاعات مورد نیاز برای اجرای برنامه شامل اطلاعات ٤ گام مدل‌سازی تعیین گردد. اطلاعات مرحله اول با استراتژی شماره یک یعنی اطلاعات جمعیت و اشتغال و ساخت مدل رگرسیون خطی در نظر گرفته شده است. این اطلاعات در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود میزان جمعیت ساکن در تمامی نواحی در محدوده ۳۰۰۰ نفر است. به علاوه با فرض ضریب رشد ۱/۷٪ برای رشد جمعیت، در افق ۱۰ ساله ۱۸٪ به جمعیت ساکن و شاغل افزوده شده است.

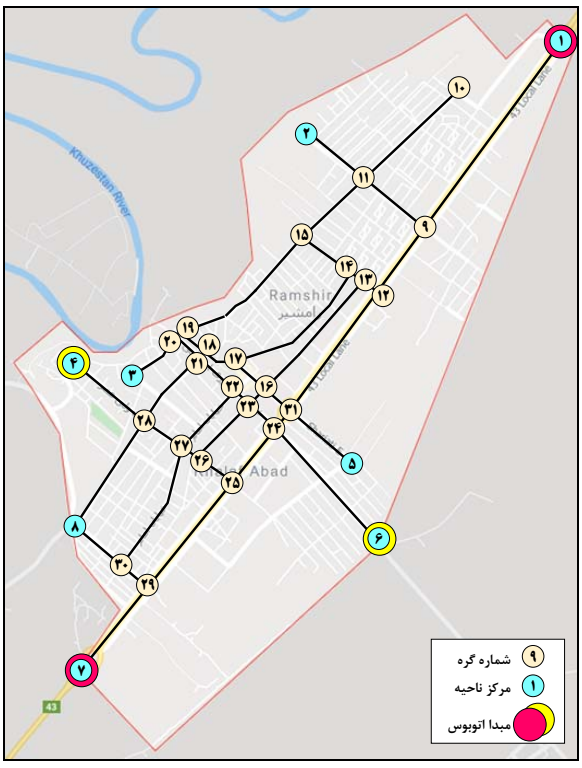
برای اطلاعات مربوط به گام دوم بایستی ماتریس تقاضای سفر برای سال پایه به نرم‌افزار معرفی گردد. این ماتریس در شرایط واقعی با استفاده از روش تکمیل پرسشنامه مدارس تعیین می‌گردد که روشی زمان‌بر و نسبتاً پرهزینه است. اطلاعات گام سوم که شامل زمان سفر و هزینه برای خودروهای شخصی و همگانی است که برای تمامی آن‌ها اعداد منطقی و مطابق با واقعیت فرض شده است. همچنین سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها ۱۰ دقیقه فرض شده است. سایر اطلاعات مورد نیاز برای مرحله سوم هزینه‌های سفر با وسایل یاد شده برای آینده است. در این مثال با فرض نرخ تورم ۱۰٪ این هزینه‌های در سال افق ۱۰ سال تقریباً ۲/۵ برابر سال پایه برآورد گردیده‌اند.

پس از وارد کردن اطلاعات ورودی در برنامه و اجرای مدل، نتایج برنامه مطابق با آنچه در بخش قبل گفته شد قابل مشاهده هستند. اطلاعات کلی شبکه شامل زمان سفر کل شبکه، وسیله-کیلومتر طی شده و میزان مصرف سوخت را نمایش می‌دهد. زمان سفر کل شبکه مجموع زمان سفر تمام وسایلی است که از کمان‌های شبکه عبور می‌کنند تا تمامی سفرها انجام شود. این متغیر در سال افق برابر ۳۵۱۷ ساعت برآورد شده است. به علاوه وسیله کیلومتر طی شده در کل شبکه برابر ۱۱۷٤۳ و میزان مصرف سوخت کل شبکه ۱۰۸٦٤ لیتر به دست آمده است. مطابق نتایج بخش قبل کمان شماره ۸ که مرکز ناحیه ۲ را به شبکه معابر متصل می‌نماید و مسیر جایگزینی برای آن وجود ندارد ترافیک زیادی داشته و در نتیجه به عنوان اولین سیاست پیشنهادی تعریض این معبر و تبدیل آن به یک مسیر ٤ خطه به جای ۳ خطه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج اجرای این سیاست در جدول (۲) آمده است. مطابق انتظار افزایش ظرفیت این کمان سبب بهبود قابل توجه وضعیت شبکه خواهد شد و به ترتیب ۱۳/۵٪ و ۱۲/۳٪ زمان سفر کل شبکه و مصرف سوخت را کاهش خواهد داد. جالب‌توجه است که اجرای این سیاست در وسیله-کیلومتر طی شده شبکه هیچ‌گونه اثری نخواهد داشت که بیانگر صحت عملکرد برنامه است؛ زیرا که تمامی خودرو در حال قبل و بعد از اجرای سیاست مجبور به عبور از مسیر یکسانی می‌باشند و این امر به معنی عدم تغییر در میسر طی شده در کل شبکه است.

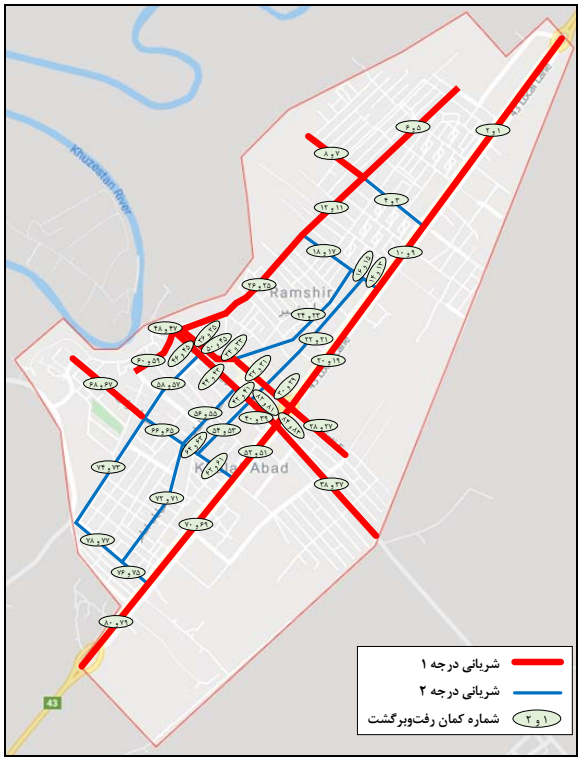
(الف) نقشه شهر




(ب) نقشه‌ی ناحیه‌بندی




(ج) شماره‌گذاری گره‌های شبکه




(د) شماره‌گذاری کمان‌های شبکه

**شکل (۸) اطلاعات مرتبط با شهرستان رامشیر**

**جدول (۱) اطلاعات کاربری (گام اول) شبکه‌ی رامشیر**

| شماره ناحیه | جمعیت ساکن | جمعیت شاغل | تولید کنونی | جذب کنونی | جمعیت ساکن آینده | جمعیت شاغل آینده |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳۰۰۰ | ۱۰۰۰ | ۴۴۸ | ۷۶۰ | ۳۵۰۰ | ۱۲۵۰ |
| ۲ | ۳۰۰۰ | ۱۰۰۰ | ۴۴۸ | ۷۶۰ | ۳۵۰۰ | ۱۲۵۰ |
| ۳ | ۳۷۵۰ | ۳۵۰ | ۶۱۲ | ۲۸۰ | ۴۳۸۰ | ۴۴۰ |
| ۴ | ۳۷۵۰ | ۳۵۰ | ۶۱۲ | ۲۸۰ | ۴۳۸۰ | ۴۴۰ |
| ۵ | ۳۲۵۰ | ۷۵۰ | ۴۹۲ | ۵۶۰ | ۳۸۰۰ | ۹۴۰ |
| ۶ | ۳۲۵۰ | ۷۵۰ | ۴۹۲ | ۵۶۰ | ۳۸۰۰ | ۹۴۰ |
| ۷ | ۳۵۰۰ | ۶۰۰ | ۵۲۸ | ۴۸۰ | ۴۱۰۰ | ۷۵۰ |
| ۸ | ۳۵۰۰ | ۶۰۰ | ۵۲۸ | ۴۸۰ | ۴۱۰۰ | ۷۵۰ |

**جدول (۲) نتایج اجرای برنامه بعد از اعمال سیاست تعریض**

| سناریو | زمان سفر کل شبکه (ساعت) | وسیله-کیلومتر کل شبکه (کیلومتر) | مصرف سوخت کل شبکه (لیتر) |
|---|---|---|---|
| سال افق | ۳۵۱۷ | ۱۱۷۴۳ | ۱۰۸۶۴ |
| سناریو تعریض کمان ۸ | ۳۰۴۲ | ۱۱۷۴۳ | ۹۵۳۲ |
| درصد تغییرات | ۱۳/۵٪ | ۰/۰٪ | ۱۲/۳٪ |

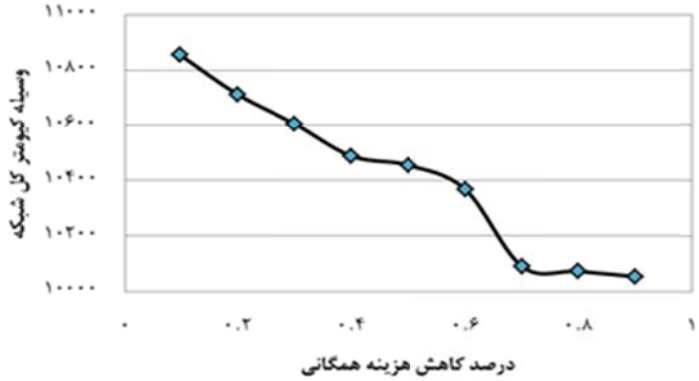
در برنامه نوشته شده در راستای افزایش مطلوبیت سیستم همگانی و سهم استفاده از آن دو ابزار اصلی تغییر سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها و تغییر قیمت کرایه آن‌ها در اختیار کاربران قرار گرفته است. در این مثال با توجه به اینکه در حدود نیمی از ظرفیت همگانی مورد استفاده قرار گرفته است و بخش قابل‌توجهی از اتوبوس‌ها خالی است در نتیجه با کاهش سرفاصله زمانی تنها تعداد اتوبوس‌ها افزایش یافته و باعث شلوغی شبکه می‌گردد. به همین منظور برای افزایش مطلوبیت همگانی از سیاست کاهش هزینه سفر همگانی استفاده شده است. در این راستا با هدف تحلیل حساسیت نتایج نسبت به هزینه همگانی، این هزینه به صورت پله‌ای و در هر مرحله ۱۰٪ کاهش یافته است. نتایج اجرای برنامه در این سیاست در جدول (۳) آمده است و به منظور تحلیل بهتر نتایج نمودارهای مربوطه در شکل‌های (۹) تا (۱۱) ترسیم گردیده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود کاهش هزینه همگانی در هر مرحله سبب افزایش تمایل به استفاده مردم از این سیستم گردیده است و نسبت تقاضای جابجا شده با اتوبوس در هر مرحله بیشتر شده است. ارزیابی‌های دقیق‌تر در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان می‌دهد که بیشترین میزان حساسیت پارامترهای زمان سفر کل شبکه و مصرف سوخت نسبت به کاهش هزینه همگانی از ۶۰٪ کاهش به ۷۰٪ کاهش مشاهده می‌شود که این مسئله می‌تواند سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل را اتخاذ تصمیم‌های صحیح‌تر یاری نماید.

## ۷- نتیجه‌گیری

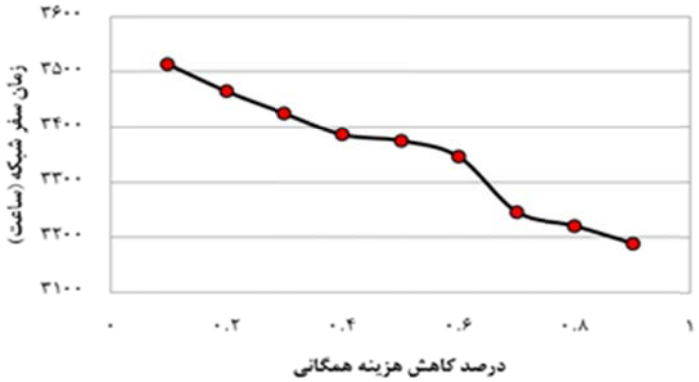
امروزه در ایران و بسیاری از کشورهای دنیا، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری که فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است تنها برای کلان‌شهرها صورت می‌پذیرد؛ چراکه این فرایند نیازمند گردآوری اطلاعاتی دقیق و ابزارهای متفاوت تحلیلی است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی تقاضای سفر وجود دارد که با توجه به شرایط موجود، هرکدام موارد استفاده متفاوتی دارند. این روش‌ها از نظر هزینه، پیچیدگی و کارایی متفاوت بوده و هر یک از جایگاه خاصی برخوردار هستند. یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل تقاضای حمل‌ونقل که به روش چهار-مرحله‌ای معروف است که با انجام محاسبات ریاضی و آماری گوناگون، ابزاری را در اختیار برنامه‌ریزان حمل‌ونقل و سیاست‌گذاران این حوزه قرار می‌دهد تا قادر به ارزیابی پیامدهای حاصل از تصمیمات حمل‌ونقلی خود باشند.

**جدول ۳. برنامه اجرای برنامه بعد از اعمال سیاست کاهش هزینه همگانی**

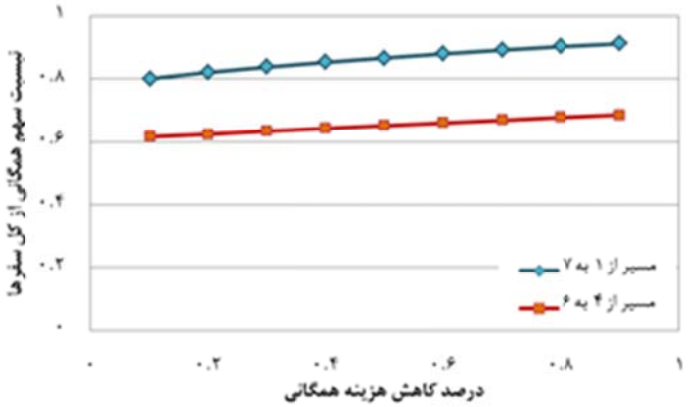
| درصد کاهش هزینه همگانی | زمان سفر کل شبکه (ساعت) | درصد کاهش زمان سفر | وسیله-کیلومتر کل شبکه (کیلومتر) | مصرف سوخت کل شبکه (لیتر) | سهم همگانی از سفرهای نواحی | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ۱ به ۷ و ۷ به ۱ | ٤ به ٦ و ٦ به ٤ |
| ۰/۱ | ۳۵۱۴ | ۰/۰۹٪ | ۱۱۷۳۹ | ۱۰۸۵۴ | ۰/۸۰۱ | ۰/۶۱۶ |
| ۰/۲ | ۳۴۶۵ | ۱/۴۸٪ | ۱۱۶۸۷ | ۱۰۷۱۲ | ۰/۸۲۱ | ۰/۶۲۴ |
| ۰/۳ | ۳۴۲۵ | ۲/۶۲٪ | ۱۱۷۵۰ | ۱۰۶۰۶ | ۰/۸۳۸ | ۰/۶۳۴ |
| ۰/۴ | ۳۳۸۶ | ۳/۷۲٪ | ۱۱۶۲۸ | ۱۰۴۸۸ | ۰/۸۵۳ | ۰/۶۴۳ |
| ۰/۵ | ۳۳۷۵ | ۴/۰۴٪ | ۱۱۶۲۱ | ۱۰۴۵۵ | ۰/۸۶۷ | ۰/۶۵۲ |
| ۰/۶ | ۳۳۴۶ | ۴/۸۶٪ | ۱۱۵۴۱ | ۱۰۳۶۸ | ۰/۸۸ | ۰/۶۶ |
| ۰/۷ | ۳۲۴۶ | ۷/۷۱٪ | ۱۱۵۶۸ | ۱۰۰۸۹ | ۰/۸۹۲ | ۰/۶۶۹ |
| ۰/۸ | ۳۲۲۱ | ۸/۴۲٪ | ۱۱۵۴۸ | ۱۰۰۷۳ | ۰/۹۰۳ | ۰/۶۷۸ |
| ۰/۹ | ۳۱۸۹ | ۹/۳۳٪ | ۱۱۵۶۲ | ۱۰۰۵۴ | ۰/۹۱۲ | ۰/۶۸۶ |




**شکل ۹. تغییرات وسیله کیلومتر طی شده با کاهش هزینه سفر همگانی**




**شکل ۱۰. تغییرات زمان سفر کل شبکه با کاهش هزینه سفر همگانی**




**شکل ۱۱. تغییرات نسبت سهم همگانی با کاهش هزینه سفر آن**

برنامه‌ریزان حمل‌ونقل شهری سیاست‌های متفاوتی نظیر توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل شخصی، توسعه ناوگان حمل‌ونقل همگانی و تغییر کاربری زمین را به منظور کاهش مشکلات ناشی از استفاده بی‌رویه از خودروهای شخصی در پیش‌گرفته‌اند. حال‌آنکه اجرای این سیاست‌ها نیازمند بودجه‌های کلان دولتی بوده و بهتر است که پیش از اجرای این طرح‌ها ابتدا پیامدهای مثبت و منفی ناشی از اجرای آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند. از طرف دیگر، محدودیت بودجه مطالعات سبب شده تا بسیاری از برنامه‌ریزان شهری بی آنکه از پیامدهای پیشنهادهای خود آگاه باشند تصمیمات خود را اتخاذ کنند. این مطالعه ابزاری کاربردی لازم را در اختیار متخصصین حوزه حمل‌ونقل شهری قرار داده تا این افراد بتوانند پیش از اجرای طرح‌ها و سیاست‌های بهبود وضعیت ترافیک شهری، عملکرد اجرای طرح را برآورد و ارزیابی نمایند.

برنامه‌های کامپیوتری که به منظور برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری توسعه یافته‌اند اغلب از یک‌سو با هدف برنامه‌ریزی کلان طراحی و تهیه شده‌اند و از سوی دیگر به دلیل پیچیدگی‌هایی که دارند نیازمند مهارت‌های ویژه‌ای برای کار کردن با آن‌ها هستند که متخصصان حوزه حمل‌ونقل کمتر با آن‌ها آشنا هستند. مهم‌ترین خروجی پروژه پیشنهادی طراحی و برنامه‌نویسی برنامه کامپیوتری بوده که قادر به مدل‌سازی برنامه‌ریزی چهارمرحله‌ای برای شهرهای بین صد هزار تا سیصد هزار نفر بوده است. در این راستا نتایج اجرای برنامه بر روی شهر رامشیر نشان داد که آگاهی از میزان سود حاصل از انجام هر پروژه، کارشناسان این حوزه را قادر خواهد ساخت تا با انجام تحلیل‌های اقتصادی منفعت به هزینه، سیاست برتر را انتخاب نمایند.

به طور خاص در خصوص نوآوری این مقاله در خصوص توسعه نرم‌افزار می‌توان به نکات زیر اشاره کرد.

– پیاده‌سازی یک نرم افزار برای ارزیابی سیاست‌های حمل‌ونقل به نحوی که برای کاربران ایرانی قابل استفاده باشد و نیازی به دانش برنامه‌نویسی نداشته باشد و بومی‌سازی اولین نسخه از نرم‌افزارهای پیش‌بینی تقاضای حمل‌ونقل در ایران.

– در این نرم‌افزار برای برآورد تقاضای سفر با توجه به اطلاعات در دسترس کاربر، امکان انتخاب روش‌های متفاوتی مانند روش نرخ سفرسازی کاربری‌ها، استفاده از روش‌های مدل‌سازی آماری و یا بهره‌گیری از ضرایب برآورد شده توسط دیگر شهرها ایجاد شده است.

– پیاده‌سازی سیاست‌های رایج در حوزه مدیریت حمل‌ونقل (برای مثال یکطرفه‌سازی) که در بسیاری از پروژه‌های حمل‌ونقل آزمایش شده است و می‌تواند در شهرها با اندازه جمعیت ۱۰۰ هزار تا ۳۰۰ هزار مورد استفاده قرار بگیرید.

– این نرم افزار قابلیت تغییر سیاست‌های مدیریت حمل‌ونقل را به دلخواه استفاده‌کننده دارد که به راحتی قابل پیاده‌سازی است و همچنین امکان ارزیابی همزمان چند سیاست که در ادبیات موضوع بسیار مورد تاکید قرار گرفته است در این نرم‌افزار بومی افزوده شده است.

– نرم‌افزارهای تجاری در این حوزه به زبان انگلیسی هستند و برای استفاده از آن‌ها نیاز به آگاهی به ادبیات حمل‌ونقل به زبان انگلیسی است که می‌تواند در صورت استفاده و عدم آگاهی از این ادبیات به تصمیمات اشتباه بیانجامد.

– نرم‌افزارهای تجاری که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد بسیار گران‌قیمت هستند و برای استفاده در شهرهای بزرگ نیاز به خرید نسخه تجاری آن‌ها هستیم. استفاده از نسخه‌های دموی این نرم‌افزارها منجر به جواب‌های نادرست می‌شود که سرمایه‌گذاری‌ها را بی‌تاثیر می‌کند.

– علاوه بر تمامی موارد یاد شده، از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به افزودن قابلیت تحلیل‌حساسیت نسبت به متغیرهای قیمت‌گذاری و پیدا کردن جواب بهینه مسئله به نرم‌افزار اشاره نمود که این مهم در مثال تغییر قیمت هزینه سفر همگانی مورد اشاره قرار گرفت.

## ۸. پی‌نوشت‌ها

1. Trip Mode
2. Car-Sharing
3. Urban Transportation Planning
4. Detroit
5. Chicago Area Transportation Study (CATS)
6. Aimsun
7. Emme - INRO
8. Trans CAD
9. Quick Response
10. Activity-based Modeling
11. Fratar
12. Furness
13. War drop

## ۷- مراجع


- http://iscanews.ir/news/829191.

- https://www.amar.org.ir.

-Larsen, O. I., & Østmoe, K., (2001), “The experience of urban toll cordons in Norway: lessons for the future”, Journal of Transport Economics and Policy (JTEP), 35(3), pp.457-471.

- Panis, L. I., Beckx, C., & Wets, G., (2009-2), “Modelling Gender Specific Exposure to Air Pollution”, Epidemiology, 20(6), S19.

- Safirova, E., Gillingham, K., Harrington, W., & Nelson, P., (2003), “Are hot lanes a hot deal? the potential consequences of converting hov to hot lanes in northern virginia”, RFF Issue Brief, 03-03.

- Sosslau, A. B., Hassam, A. B., Carter, M. M., & Wickstrom, G. V., (1978), “Quick Response Urban Travel Estimation Techniques and Transferable Parameters”, User Guide, NCHRP Report 187, Transportation Research Board, Washington, DC.

- T. A. I. Council, (2018), “T1 Travel Demand Modelling”.

- Vander Laan, Z., & Sadabadi, K. F., (2017), “Operational performance of a congested corridor with lanes dedicated to autonomous vehicle traffic”, International Journal of Transportation Science and Technology, 6(1), pp.42-52.

- Wikipedia, “https://en.wikipedia.org/wiki.

- Zhu, F., & Ukkusuri, S. V., (2015), “A linear programming formulation for autonomous intersection control within a dynamic traffic

-Dhondt, S., Beckx, C., Degraeuwe, B., Lefebvre, W., Kochan, B., Bellemans, T., & Putman, K. (2012), "Health impact assessment of air pollution using a dynamic exposure profile: implications for exposure and health impact estimates", Environmental impact assessment review, 36, pp.42-51.

-Habibian, M., & Kermanshah, M., (2013), "Coping with congestion: Understanding the role of simultaneous transportation demand management policies on commuters", Transport Policy, 30, pp.229-237.

-Habibian, M., Dibaj, S., & Rahmati, Y., (2014), "Investigating the Role of Push and Pull TDM Policies on Car Commuters for Short Trips", In 93rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC.

-Habibian, M., Jafari, M. O., & Branch, P., (2013), "Assessing the role of transportation demand management policies on urban air pollution: a case study of Mashad, Iran. Section 3", Case Studies on Specific Urban Areas: Understanding the Roles of Key Economic, Geographic, and Urban Design Inputs in the Pollution Characterization or Mitigation Scenarios, pp.87-97.

-Hatzopoulou, M., & Miller, E. J., (2010), "Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto", Transportation Research Part D: Transport and Environment, 15(6), pp.315-325.

-Hensher, D. A., & Button, K. J., (2000), "Handbook of transport modelling (No. 1)".

-Litman, T., (2003), "The Online TDM Encyclopedia: mobility management information gateway", Transport Policy, 10(3), pp.245-249.

-Mafi, Sh., Mohammadi, A., Kermanshahi, Sh., & Talebian, A., (2023), "Are There Differences between People When it Comes to assignment and connected vehicle environment", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55, pp.363-378.

-Beckx, C., Panis, L. I., Uljee, I., Arentze, T., Janssens, D., & Wets, G., (2009-3), "Disaggregation of nation-wide dynamic population exposure estimates in The Netherlands: Applications of activity-based transport models", Atmospheric Environment, 43(34), pp.5454-5462.

-Beckx, C., Panis, L. I., Van De Vel, K., Arentze, T., Lefebvre, W., Janssens, D., & Wets, G., (2009-1), "The contribution of activity-based transport models to air quality modelling: a validation of the ALBATROSS–AURORA model chain", Science of the Total Environment, 407(12), pp.3814-3822.

-Beckx, C., Panis, L. I., Vankerkom, J., Janssens, D., Wets, G., & Arentze, T., (2009-2), "An integrated activity-based modelling framework to assess vehicle emissions: approach and application", Environment and Planning B: Planning and Design, 36(6), pp.1086-1102.

-Biezus, L., & Rocha, A. J. O., (2000), "Does Congestion Management Improve Public Transit? In Urban Public Transportation Systems", Proceedings of the First International ConferenceAmerican Society of Civil Engineers", Committee on Public Transport, Urban Transportation Division.

-Broaddus, A., Litman, T. and Menon, G., (2009), "Transportation demand management: Training document. Eschborn, Germany: Federal Ministry for Economic Cooperation and Development".

-Choobchian, P., Mohammadi, A., Vali Nejad, M., Zou, B., Shin, J., & Sriraj, P. S. (2023), "A Data-Driven Approach to Evaluate Walkability Using Actual Commute Walk Trips" Transportation Research Board, No. TRBAM-23-04742.

modeling and simulation for autonomous vehicles.

-Shahangian, R., Kermanshah, M., & Mokhtarian, P. L., (2012), "Gender Differences in Response to Policies Targeting Commute to Automobile-Restricted Central Business District", Stated Preference Study of Mode Choice in Tehran, Iran. Transportation research record, 2320(1), pp.80-89.

-Shiftan, Y., (2000), "The advantage of activity-based modelling for air-quality purposes: theory vs practice and future needs", Innovation, The European Journal of Social Science Research, 13(1), pp.95-110.

-T. A. I. Council, (2018), "T1 Travel Demand Modelling".

-Talebpour, A., & Mahmassani, H. S., (2016), "Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 71, pp.143-163.

Transportation_forecasting" .

-Weiner, E., (1997), "Urban transportation planning in the United States: an historical overview", US Department of Transportation.

-Zhu, F., & Ukkusuri, S. V., (2015), "A linear programming formulation for autonomous intersection control within a dynamic traffic assignment and connected vehicle environment", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55, pp.363-378.

-Zou, B., Choobchian, P., & Rozenberg, J., (2021), "Cyber resilience of autonomous mobility systems: cyber-attacks and resilience-enhancing strategies", Journal of transportation security, pp.1-19.

Adopting Telework from Different Near-Home Shared Offices?", Transportation Research Board (No. TRBAM-23-03429).

-Martin, W. A., & McGuckin, N. A., (1998), "Travel estimation techniques for urban planning, Vol. 365, Washington, DC: National Academy Press.

-Menendez, M., & Daganzo, C. F., (2007), "Effects of HOV lanes on freeway bottlenecks", Transportation Research Part B: Methodological, 41(8), pp.809-822.

-Mitchell, R. B., & Rapkin, C., (1954), "Urban traffic: A function of land use", Columbia University Press.

-Mohammadi, A., & Choobchian, P., (2022), "Improving Walkability by Focusing on Residents' Needs and Neighborhood's Built Environment", In Leveraging Sustainable Infrastructure for Resilient Communities, pp. 70-81.

-Mohammadi, A., & Kermanshah, M., (2019), "A Comparative Study of Objective and Subjective Variables Between Men and Women on Vehicle Type Choice in a Developing Country", Transportation Research Board (No. 19-01088).

-Panis, L. I., Beckx, C., & Wets, G., (2009-1), "Socio-Economic Class and Exposure to NO2 Air Pollution in the Netherlands", Epidemiology, 20(6), S19.

-Pucher, J., Dill, J. and Handy, S., (2010), "Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review", Preventive medicine, 50, pp.S106-S125.

-Qian, S., & Yang, S., (2016), "What do autonomous vehicles mean to traffic congestion and crash?", Network traffic flow

# Four-Step Modeling of Transportation Demand for Cities with a Population of 100,000 To 300,000

*Ali Mohammadi, Ph.D., Grad., Department of Civil Engineering, University of Technology, Tehran, Iran.*

*Reza Mohammad Hasany, Assistant Professor, School of Rail Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: rmhasany@iust.ac.ir*

Received: February 2023- Accepted: April 2023

**ABSTRACT**

Urban transportation planning is a process that leads to decisions about transportation plans and policies. The purpose of this process is to provide the information needed to decide when, where, and how to improve the efficiency of the transportation system. Requiring this information and making sure it works is followed by a rational and systematic planning process. For this purpose, in this study, we initially introduce the varied methods of transportation management and important policies in the field of urban transportation planning. Subsequently, it has attempted to implement mathematical and statistical models used in the traditional four-steps of trip production and attraction, trip distribution, mode choice, and traffic assignment by developing a four-step transportation demand modeling computer program. C ++ has been used to build this program. The program written in this study will enable transport policymakers to analyze and evaluate the positive and negative consequences of their plans to improve transportation conditions subject to project limitations and the high costs involved.

**Keywords:** Four-Step Model, Transportation Demand, Policy Evaluation, Trip Production, Traffic Assignment