

# پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمان سفر کمان‌های شبکه حمل‌ونقل شهری با استفاده از داده‌های موقعیت‌یاب‌های اتوبوس‌های شهری

روزبه فروزنده<sup>۱</sup>، فرشاد حکیم‌پور<sup>۲\*</sup>، نوید خادمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس

دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

r\_foroozandeh@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

fhakimpour@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

navid.khademi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۴، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۴)

## چکیده

زمان سفر کمان‌های شبکه حمل‌ونقل شهری، مهم‌ترین متغیر برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مسیر سفر و زمان آغاز سفرهای شهری است. زمان سفر در کمان‌های تشکیل دهنده شبکه حمل‌ونقل، اساس کار سامانه‌های ناوبری و مسیریابی است. به طور مشخص، الگوریتم‌های مسیریابی زمانمند، سریع‌ترین مسیر را بر اساس مدت زمان سفر کمان‌های شبکه در زمان‌های مختلف محاسبه می‌کنند. در واقع اطلاعات زمان سفر برای بازه‌های زمانی آینده، مبنای روش‌های مسیریابی زمانمند است. با فراگیر شدن استفاده از موقعیت‌یاب‌های قابل حمل مبتنی بر سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، استفاده از داده‌های تولید شده توسط این دستگاه‌ها برای تعیین سرعت جریان ترافیک در شبکه راه مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های دریافتی از موقعیت‌یاب‌های اتوبوس‌های شهری، زمان سفر کمان‌های شبکه شریانی به صورت آنی محاسبه می‌شود. تعیین زمان سفر کمان‌ها در بازه‌های زمانی، نیازمند تحلیل داده‌های مکانی-زمانی است. برای پیش‌بینی کوتاه مدت زمان سفر از تحلیل حالت-وینترز استفاده شده است. برای افزایش دقت تخمین‌ها، از اطلاعات زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی نیز در محاسبات استفاده شده است. برای اعتبار سنجی روش پیشنهادی و همچنین محاسبه برخی از پارامترهای مدل از سه خودروی آزمایش در یک روز مشخص استفاده شده است. در نهایت، زمان سفر محاسبه شده با روش پیشنهادی، با نتایج حاصل از دو روش پرکاربرد در محاسبه زمان سفر کمان مقایسه شده است. با کاهش ۲۲ درصدی میانگین RMSE در بازه‌های زمانی مختلف، مقایسه صورت گرفته بهبود دقت محاسبه زمان سفر کمان در حالت استفاده از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. بهبود دقت نتایج، کارایی استفاده از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** زمان سفر کمان، موقعیت‌یاب اتوبوس، تحلیل حالت وینترز، محاسبه آنی، داده مکانی-زمانی

## ۱- مقدمه

عوامل مختلفی در انتخاب مسیر سفرهای شهری دخیل است. زمان سفر از جمله مهم‌ترین متغیرها برای انتخاب مسیر سفر و همچنین زمان آغاز سفر است. برای تعیین مدت زمان سفر یک مسیر، نیاز به زمان سفر کمان‌های تشکیل دهنده مسیر است. در واقع روش‌های مسیریابی معمولاً بر اساس زمان سفر کمان‌های شبکه راه (به عنوان اجزای تشکیل دهنده شبکه راه)، مناسب‌ترین مسیر را محاسبه می‌کنند. علاوه بر مسیریابی، زمان سفر کمان‌های شبکه راه، در بسیاری از تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌های حوزه مدیریت شهری دخیل است. تاکنون از روش‌های مختلفی برای تعیین زمان سفر استفاده شده است. استفاده از دوربین‌های ترافیکی و همچنین سنجنده‌های الکترومغناطیسی پرکاربردترین روش‌ها هستند [۱]. استفاده از دوربین‌های ترافیکی برای محاسبه زمان سفر با دشواری‌هایی همراه است. معمولاً روش‌های مبتنی بر دوربین‌های ترافیکی نیازمند نیروی انسانی برای پایش وضعیت ترافیک هستند. علاوه بر این در صورت استفاده از دوربین‌های ترافیکی، زمان سفر به صورت کمی قابل بیان نیست و معمولاً وضعیت حرکت خودروها به صورت متغیرهای کیفی (سنگین، متوسط و روان) قابل بیان است. از سنجنده‌های الکترومغناطیسی در بسیاری از تقاطع‌ها برای محاسبه حجم ترافیک استفاده می‌شود. امکان تعیین زمان سفر کمان از طریق این سنجنده‌های الکترومغناطیسی به صورت دقیق وجود ندارد. تاکنون از سنجنده‌های الکترومغناطیسی برای محاسبه تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی استفاده شده است [۲]. تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی تنها بخشی از زمان سفر است و زمان سفر کمان را تعیین نمی‌کند.

در بسیاری از شهرهای جهان، ناوگان‌های حمل‌ونقل عمومی مثل اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها به دستگاه‌های موقعیت‌یاب مجهز شده‌اند. دلیل تجهیز ناوگان‌های شهری به تجهیزات موقعیت‌یابی، پایش عملکرد این ناوگان‌ها است. با گسترش استفاده از سامانه‌های موقعیت‌یاب قابل حمل، توجه زیادی به سمت استفاده از داده‌های این سامانه‌ها برای تعیین زمان سفر کمان‌های شبکه حمل‌ونقل شهری معطوف شده است. به داده‌هایی که توسط خودروهای درون شبکه حمل‌ونقل جمع‌آوری می‌شوند، اصطلاحاً «داده‌های

خودروهای شناور<sup>۱</sup>» و یا «داده‌های خودروهای کاوشگر<sup>۲</sup>» گفته می‌شود. در حال حاضر در شهر تهران، ناوگان اتوبوس‌رانی شهری به طور کامل به تجهیزات موقعیت‌یابی مجهز شده است. موقعیت اتوبوس‌ها هر دو دقیقه یک بار به یک پایگاه داده ارسال می‌شود. علاوه بر این در هنگام باز شدن و بسته شدن درب اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های اتوبوس، موقعیت و زمان این رویداد به پایگاه داده مخابره می‌شود. به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از داده‌های حاصل از موقعیت‌یاب‌های اتوبوس‌های شهری، زمان سفر کمان‌های شهری را محاسبه کرد. برای مثال با تعیین اختلاف زمان ورود یک خودرو به کمان و خروج همان خودرو از کمان، زمان سفر آن کمان را مشخص کرد. مهم‌ترین نکته در محاسبه زمان سفر کمان‌ها با استفاده از داده‌های موقعیت‌یاب این است که این داده‌ها الزاماً موقعیت اتوبوس را در ابتدا و انتهای کمان مشخص نمی‌کند. در واقع ممکن است مشاهدات موقعیت‌یاب در هر نقطه از کمان انجام گیرد. این مسئله امکان محاسبه زمان ورود اتوبوس به کمان و خروج از آن را دشوار می‌کند. تعدادی از پژوهشگران تعیین مدت زمان حضور کاوشگر در هر کمان را مسئله تفکیک زمان سفر [۳] و یا تخصیص مشاهدات زمان سفر [۴] نامیده‌اند و با استفاده از تحلیل‌های مکانی-زمانی راهکارهایی برای حل آن پیشنهاد کرده‌اند. چالش دیگری که بر سر راه محاسبه زمان سفر کمان با استفاده از داده‌های موقعیت اتوبوس‌ها وجود دارد، تفاوت زمان سفر اتوبوس‌ها و خودروهای عادی است. اتوبوس‌ها با رسیدن به ایستگاه‌های اتوبوس از جریان ترافیک خارج می‌شوند و همچنین به طور کلی به دلیل تمایل به حرکت در خط سمت راست خیابان‌ها، حرکت کندتری نسبت به جریان عادی خودروها دارند. ارائه راه حل برای این مسئله نیز توسط تعدادی از پژوهش‌گران مورد توجه قرار گرفته است [۵ و ۶]. اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با استفاده از داده‌های موقعیت و زمان خودروها برای تعیین زمان سفر صورت گرفته است، تحقیقات کنونی پاسخگوی برخی نیازها نیست. هیچ کدام از تحقیقاتی که در زمینه استفاده از داده‌های اتوبوس‌ها صورت گرفته است، تعیین زمان سفر کمان‌ها را مورد توجه قرار نداده است. در واقع تمام تحقیقات بر تعیین زمان سفر یک مسیر (متشکل از چند کمان)

۱ Floating Car Data (FCD)

۲ Probe Vehicle Data (PVD)

رسیدن و ترک خودروها به هر ایستگاه را مشخص می‌کنند. همین‌طور حداکثر سرعت لحظه‌ای که اتوبوس‌ها در فاصله بین دو ایستگاه به آن می‌رسند را نیز ثبت می‌کند. در این پژوهش یک مقایسه بین اطلاعات حاصل از حرکت اتوبوس‌های شهری و اطلاعات کنترلی که توسط خودروهای سواری تهیه شده است، انجام شده است. برتینی برای برقراری ارتباط بین زمان سفر خودروهای عادی با زمان سفر اتوبوس، تعریفی را تحت عنوان شبه‌اتوبوس<sup>۱</sup> مطرح کرد. در حالت شبه اتوبوس، خط‌سیر اتوبوس با این فرض ساخته می‌شود که اتوبوس در تمام فاصله بین دو ایستگاه با حداکثر سرعتی که در فاصله بین دو ایستگاه به آن رسیده است، حرکت کرده است. این سناریو بر مبنای این فرض مطرح می‌شود که حداکثر سرعت اتوبوس نشان‌دهنده سرعت حرکت خودروهای عادی است. به‌علاوه در این حالت فرض می‌شود که اتوبوس در ایستگاه‌های اتوبوس توقف ندارد. پژوهش‌گران به این نتیجه رسیدند که متوسط سرعت خودروها ۱/۳۶ برابر شبه اتوبوس است. با این حال مشخص شد که سرعت شبه اتوبوس و خودروها در قسمتی از مسیر (بر روی یک پل نسبتاً بزرگ) به هم نزدیک‌تر می‌شوند. دلیل این امر حرکت هر دو نوع خودرو با سرعت جریان آزاد در این مقطع تفسیر شده است.

نابیهیرو و همکاران در سال ۲۰۰۹، پژوهشی در زمینه تخمین میزان تغییرپذیری<sup>۲</sup> زمان سفر، با استفاده از کاوشگر اتوبوس انجام دادند [۶]. در واقع هدف اصلی از این پژوهش بررسی میزان اعتمادپذیری به زمان سفر مشاهده شده توسط کاوشگر اتوبوس است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعاتی است که هر یک ثانیه توسط گیرنده GPS دریافت و در حافظه یک دستگاه داخلی ذخیره می‌شود. در این پژوهش، توزیع زمان سفر اتوبوس با استفاده از مشاهدات اتوبوس‌ها مشخص شده است. با بررسی نمودار ستونی توزیع زمان سفر اتوبوس، پژوهش‌گران این حدس را مطرح کردند که زمان سفر اتوبوس احتمالاً از توزیع لوگ‌نرمال پیروی می‌کند. پژوهش‌گران با ایجاد تابع لوگ‌نرمال با استفاده از میانگین و انحراف معیار به دست آمده از مشاهدات اتوبوس‌ها به این نتیجه رسیدند که در بیشتر مواقع، زمان سفر اتوبوس از توزیع لوگ‌نرمال پیروی

متمركز هستند. در پژوهش حاضر روشی جدید برای تعیین آنی و پیش‌بینی زمان سفر کمان‌های چراغ‌دار معرفی شده است. تفاوت عمده زمان سفر کمان‌های چراغ‌دار و بدون چراغ در تغییر پذیری بالای زمان سفر کمان‌های چراغ‌دار نسبت به کمان‌های بدون چراغ است. این تغییر پذیری با در نظر گرفتن زمان‌بندی چراغ راهنمایی قابل محاسبه است. پژوهشگران در این مطالعه بر روی دو مسئله تمرکز کرده‌اند: ترکیب داده‌های تجهیزات موقعیت‌یابی و اطلاعات زمان‌بندی چراغ راهنمایی برای تعیین زمان سفر کمان برای اتوبوس‌ها و (۲) اعمال تصحیحات لازم بر روی داده‌های اتوبوس‌ها برای رسیدن به زمان سفر خودروهای عادی. زمان سفر کمان در این پژوهش به زمان حرکت اتوبوس در کمان و تأخیر چراغ راهنمایی تقسیم شده است. استفاده از اطلاعات چراغ راهنمایی (بدون استفاده از اطلاعات حجم خودروها) یکی از نوآوری‌های این پژوهش است. ارائه روشی برای محاسبه زمان تلف شده توسط اتوبوس در ایستگاه، دیگر مشارکت علمی این پژوهش است. لازم به ذکر است که داده‌های استفاده شده در این پژوهش مربوط به اطلاعات سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس‌های خطوط ۸۸۰۳ و ۳۰۱۱ شرکت واحد اتوبوس‌رانی تهران است.

در بخش‌های بعدی، نحوه محاسبه زمان سفر کمان برای اتوبوس‌ها معرفی شده و نهایتاً روشی به منظور محاسبه زمان سفر کمان برای خودروهای عادی پیشنهاد می‌شود. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در بخش پیاده‌سازی و نتایج معرفی می‌شود. کلیات روش محاسبه زمان سفر در بخش ۳ مطرح می‌شود. در بخش ۳ تا ۸، جزئیات روش پیشنهادی برای تعیین زمان سفر خودرو (از این پس به جای عبارت زمان سفر «خودروهای عادی» از زمان سفر «خودرو» استفاده می‌شود) با استفاده از داده‌های کاوشگر اتوبوس معرفی می‌شود. در ادامه تعدادی دیگر از مهمترین مطالعات مهم صورت گرفته در زمینه محاسبه زمان سفر با استفاده از داده‌های خودروهای شناور معرفی می‌شوند.

## ۲- پیشینه پژوهش

برتینی و همکاران در سال ۲۰۰۳، پژوهشی بر روی داده‌های حاصل از موقعیت‌یاب‌های خودکار نصب‌شده بر روی قسمتی از ۶۰۰ اتوبوس موجود در پورتلند در اورگان انجام دادند [۵]. سامانه گسیل خودروها در این شهر، زمان

<sup>۱</sup> Pseudo bus  
<sup>۲</sup> Variability

می‌کند. با ترکیب توابع توزیع به دست آمده از مسیرهای مختلف، امکان تعیین توزیع زمان سفر یک مسیر جدید، که ترکیبی از قسمت‌های مختلف مسیرهای قبلی است، به وجود می‌آید. آزمایش‌ها نشان داد که تابع توزیع ترکیبی نیز از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند و تابع تولید شده به خوبی توزیع زمان سفر مسیرهای جدید را (که ترکیبی از مسیرهای قبلی است) نشان می‌دهد.

ون زولین و همکاران در سال ۲۰۱۰، توابع توزیع تأخیر چراغ راهنمایی را برای شرایط گوناگون ترافیکی مدل‌سازی کردند [۷]. آنها با بازسازی اطلاعات دریافتی از خودروهای کاوشگر، پارامترهای توزیع تأخیر چراغ راهنمایی را محاسبه کردند. پژوهشگران پارامترهای بهینه تابع توزیع تأخیر را از طریق الگوریتم ژنتیک تخمین زدند. برای این کار از برآوردکننده‌های «درست‌نمایی بیشینه»<sup>۱</sup> و کمترین مربعات استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از برآوردکننده درست‌نمایی بیشینه، نتایج بهتری در مقایسه با کمترین مربعات دارد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از طریق شبیه‌ساز ترافیک به دست آمده است. به طور کلی در این پژوهش استفاده از داده‌های مربوط به کاوشگر اتوبوس مد نظر نبوده است.

هافلینتر و همکاران در سال ۲۰۱۲، روشی را برای تعیین زمان سفر کمان‌های شبکه با استفاده از داده‌های تجهیزیات موقعیت‌یابی تاکسی‌های شهری در کالیفرنیا ارائه کردند [۸ و ۹]. آن‌ها زمان سفر کمان را به زمان حرکت آزاد در کمان و زمان توقف در پشت چراغ راهنمایی تقسیم کردند. پژوهشگران تابع توزیع احتمال زمان سفر را مدل‌سازی کرده و پارامترهای مدل را با استفاده از داده‌های تاکسی‌ها تخمین زدند. آنها برای تعیین تابع توزیع زمان سفر فرض کردند که جریان وارد شونده به یک کمان دارای توزیع یکنواخت است. پژوهشگران همچنین فرض کردند که متوسط جریان وارد شونده به یک کمان و جریان خارج شونده از آن از یک الگوی تاریخی پیروی می‌کنند. نهایتاً نتایج نشان داد که روش پیشنهادی پژوهش در مقایسه با روش‌های پیشین از عملکرد بهتری برخوردار است.

برای اثبات کارایی روش پیشنهادی پژوهش، این روش با دو روش پراستفاده در زمینه محاسبه زمان سفر کمان مقایسه شده است. روش اول به روش «خط مبنا» مشهور

است [۸] و روش دوم توسط هلینگا ارائه شده است [۴]. در اینجا از هر دو روش برای محاسبه «زمان سفر کمان برای اتوبوس» استفاده می‌شود. در روش خط‌مبنا، برای تفکیک مشاهدات زمان سفر به کمان‌ها، زمان سفر به نسبت طول کمان‌ها بین آنها تقسیم می‌شود. سپس از زمان سفرهای به دست آمده برای هر کمان در هر بازه زمانی میانگین گرفته می‌شود. مزیت این روش سادگی پیاده‌سازی آن است. با این حال، در صورتی که برای یک بازه زمانی مشاهده‌ای وجود نداشته باشد، امکان محاسبه زمان سفر برای آن بازه زمانی وجود ندارد. هلینگا و همکاران روشی را برای تفکیک مشاهدات زمان سفر به کمان‌های شبکه معرفی کرده‌اند. به دلیل سادگی، معمولاً از این روش برای محاسبه زمان سفر کمان استفاده می‌شود. هلینگا زمان سفر کمان را به سه قسمت تقسیم می‌کند: (۱) زمان سفر حرکت با سرعت جریان آزاد، (۲) تأخیر ناشی از تراکم ترافیک و (۳) تأخیر ناشی از تقاطع. اگرچه هلینگا تأخیر ناشی از تقاطع را به صورت صریح در نظر می‌گیرد، روش او اساساً تفاوتی بین انواع تقاطع‌ها قائل نمی‌شود. به طور مثال تغییرات تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی، در محاسبات این روش نقشی ندارد. علاوه بر این، هلینگا فرض می‌کند که هر خودرو تنها یک بار در صف یک چراغ راهنمایی توقف می‌کند. این مسئله به آن معنا است که در شرایط ترافیکی اشباع، استفاده از روش هلینگا با خطا همراه است (برای جزئیات بیشتر به [۴] مراجعه شود).

### ۳- مراحل محاسبه زمان سفر خودرو

«زمان سفر کمان» برابر با متوسط زمانی است که خودروها برای طی کردن یک کمان صرف می‌کنند. منظور از زمان لازم برای طی کردن یک کمان، اختلاف بین زمان ورود به کمان و زمان خروج از کمان است. «کمان» در شبکه شریانی، به معنای حد فاصل بین دو تقاطع در شبکه راه است. در صورتی که در پایین‌دست یک کمان، چراغ راهنمایی برای کنترل حرکت خودروهای واقع در آن کمان وجود داشته باشد، به چنین کمانی «کمان چراغ‌دار» اطلاق می‌شود. تمرکز این پژوهش بر روی محاسبه زمان سفر در کمان‌های چراغ‌دار است و برای رعایت سادگی از عبارت کمان به جای کمان چراغ‌دار استفاده می‌شود. برای تعیین زمان سفر یک کمان با استفاده از داده‌های

<sup>۱</sup> Maximum likelihood

به طور کلی در این پژوهش، تعیین تغییرات لحظه‌ای زمان سفر مد نظر نیست. در واقع هدف این پژوهش دستیابی به تخمینی از زمان سفر در «بازه‌های زمانی» است. برای رسیدن به این هدف، مدت زمان طول روز گسسته‌سازی می‌شود. برای این منظور، طول روز به بازه‌های زمانی با طول مشخص (برای مثال بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای) تقسیم می‌شود. فرض بر این است که متغیرهای موثر بر زمان سفر هر کمان در طول یک بازه زمانی ثابت هستند. این متغیرها در بخش‌های بعدی معرفی می‌شوند. در بخش ۴، روش تعیین تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس مشخص شده است. آن گونه که در بخش ۴ بیان می‌شود، محاسبه پارامترهای تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس، به مقدار تأخیر چراغ راهنمایی وابسته است. در بخش ۵ نحوه محاسبه تأخیر چراغ راهنمایی معرفی می‌شود. محاسبه تأخیر چراغ راهنمایی نیز وابسته به معلوم بودن تأخیر ایستگاه اتوبوس است. با این توضیحات، پارامترهای توابع تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس و تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی باید به صورت همزمان محاسبه شوند. برای محاسبه همزمان این مجهولات، از یک روش تکراری استفاده می‌شود. این روش در بخش ۶ توضیح داده شده است. بخش ۷ و ۸ به معرفی روش محاسبه آنی و پیش‌بینی زمان سفر خودرو اختصاص دارد.

#### ۴- تخمین تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس با استفاده از مشاهدات تاریخی

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، یکی از دلایل تفاوت زمان سفر اتوبوس‌ها و خودروها، تأخیر ناشی از ایستگاه‌های اتوبوس است. در پژوهش‌های پیشین، همه پژوهشگران مدت زمان «توقف کامل اتوبوس» در ایستگاه را به عنوان زمان تلف شده یا تأخیر اتوبوس در ایستگاه در نظر گرفته‌اند. با این حال تنها دلیل ایجاد تأخیر در حرکت اتوبوس، توقف کامل اتوبوس در ایستگاه نیست. شتاب کاهنده و افزایش اتوبوس پیش از ورود به ایستگاه و بعد از خروج از ایستگاه نیز عاملی مهم در کند شدن حرکت اتوبوس است. در پژوهش حاضر، فرض بر این است که زمان توقف کامل در دسترس است (با داشتن زمان باز و بسته شدن درب اتوبوس در ایستگاه). بنابراین منظور از زمان تلف شده در این پژوهش، مجموع زمان تلف شده اتوبوس در اثر

موقعیت‌یاب‌ها و اطلاعات زمان‌بندی چراغ راهنمایی، یک مدل مکانی-زمانی ارائه شده است. موقعیت اتوبوس در لحظات مختلف به عنوان داده‌های مکانی و زمان‌های مرتبط با این داده‌های مکانی و همچنین اطلاعات زمان‌بندی چراغ راهنمایی به عنوان داده‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مکانی-زمانی مورد استفاده در این پژوهش به دو بخش مجزا تقسیم شده است:

۱) در بخش اول، «زمان سفر کمان برای اتوبوس» محاسبه می‌شود. این متغیر به معنای متوسط مدت زمانی است که یک اتوبوس شهری برای طی کردن یک کمان صرف می‌کند. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، بسیاری از پژوهشگران برای تعیین زمان سفر کمان، از روش‌هایی با عنوان تخصیص<sup>۱</sup> و یا تفکیک<sup>۲</sup> زمان سفر استفاده می‌کنند. در واقع آنها در ابتدا مدت زمان حضور هر خودروی کاوشگر در یک کمان را تخمین زده و سپس زمان سفرهای تفکیک شده را به گونه‌ای با هم ادغام کرده اند. برای مثال از میانگین گیری زمان سفرهای تفکیک شده برای ادغام آنها استفاده شده است. در این پژوهش تفکیک زمان سفر به صورت یک مرحله مجزا انجام نمی‌شود؛ به جای آن با تلفیق همزمان داده‌های کاوشگرها و اطلاعات زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی، زمان سفر اتوبوس برای هر کمان محاسبه می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که در مدل پیشنهادی، زمان سفر کمان برای اتوبوس با در نظر گرفتن تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس، سرعت اتوبوس در یک کمان و تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی محاسبه می‌شود. محاسبه این متغیرها به صورت جداگانه (آنگونه که در بخش بعدی گفته می‌شود) می‌تواند باعث افزایش دقت برآورد زمان سفر کمان برای خودروها شود.

۲) در بخش دوم مدل، بعد از محاسبه زمان سفر کمان برای اتوبوس، «زمان سفر کمان برای خودرو» محاسبه می‌شود. این کار از طریق ایجاد یک رابطه بین زمان سفر اتوبوس و زمان سفر خودرو انجام می‌شود. در این پژوهش فرض بر این است که تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی برای اتوبوس‌ها و خودروهای عادی در شرایط مشابه یکسان است. در واقع با این فرض، تفاوت زمان سفر اتوبوس و خودروها در زمان حرکت آنها رخ می‌دهد.

<sup>۱</sup> Allocation  
<sup>۲</sup> Decomposition

با سرعت ثابت  $v_{out}$  حرکت می‌کند. تغییر سرعت اتوبوس در هنگام ورود به ایستگاه و هنگام خروج از ایستگاه با شتاب ثابت صورت می‌گیرد (شکل (۱)).

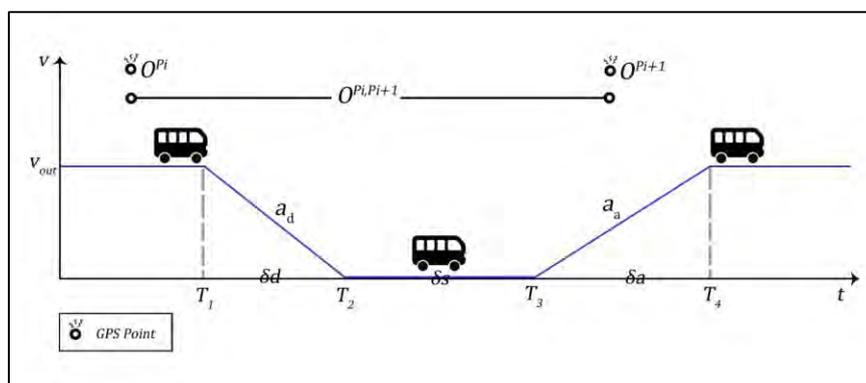
در شکل (۱) فرض شده است که ایستگاه اتوبوس از چراغ راهنمایی فاصله دارد و تغییر سرعت اتوبوس هنگام اضافه شدن به صف چراغ راهنمایی در نظر گرفته نشده است. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است، اتوبوس در زمان  $T_1$  شتاب کاهنده  $a_d$  را آغاز می‌کند و در زمان  $T_2$  کاملاً در ایستگاه متوقف می‌شود. توقف اتوبوس تا زمان  $T_3$  ادامه دارد و بعد از آن با شتاب افزایشی  $a_a$  شروع به حرکت می‌کند و در زمان  $T_4$  به سرعت ثابت می‌رسد. با این فرض و بر مبنای شکل (۱) معادله سرعت اتوبوس بر حسب زمان به صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$v(t) = \begin{cases} v_{out} & t \leq T_1 \\ v_{out} - \frac{v_{out}}{T_2 - T_1} \times (t - T_1) & T_1 < t \leq T_2 \\ 0 & T_2 < t \leq T_3 \\ \frac{v_{out}}{T_4 - T_3} \times (t - T_3) & T_3 < t \leq T_4 \\ v_{out} & t > T_4 \end{cases} \quad (1)$$

در صورتی که فرض شود یک اتوبوس در ایستگاه اتوبوس توقف نمی‌کند، به چنین اتوبوسی «اتوبوس فرضی» گفته می‌شود. یک اتوبوس فرضی یا در صف چراغ راهنمایی منتظر است و یا در کمان با سرعت  $v_{out}$  حرکت می‌کند. بنابراین سرعت اتوبوس فرضی برابر  $v_{out}$  است.  $v_{out}$  «سرعت خارج از ایستگاه» اتوبوس نامیده می‌شود. سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس در کمان  $l$  و در زمان  $t$  با  $v_{out}^{l,t}$  نمایش داده می‌شود. برای سادگی، اندیس  $l, t$  در اغلب روابط حذف شده است.

کاهش و افزایش سرعت در ایستگاه به علاوه زمان توقف کامل اتوبوس است. پیش از این، محققان عوامل مختلفی را در میزان تأخیر اتوبوس در ایستگاه مؤثر دانسته‌اند. برای مثال تراکم جریان ترافیک، نوع ایستگاه اتوبوس و تعداد خطوط شریان، تعدادی از متغیرهای اصلی در مقدار زمان تلف شده در ایستگاه هستند [۱۰]. در این پژوهش، توابع تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس برای «شرایط مختلف ترافیکی» تعیین می‌شوند. هدف این بخش، تعیین تابع تأخیر ایستگاه اتوبوس برای هر ایستگاه به صورت جداگانه و با استفاده از اطلاعات موقعیت‌یاب اتوبوس‌ها است. اطلاعات اتوبوس‌ها شامل اطلاعات موقعیت و زمان برای اتوبوس‌ها است که هر دو دقیقه یک بار به یک سرور ارسال می‌شود. علاوه بر این در هنگام باز و بسته شدن درب اتوبوس در ایستگاه نیز اطلاعات مشابهی به سرور ارسال می‌شود که امکان محاسبه مستقیم «زمان توقف کامل اتوبوس» را فراهم می‌آورد. شن و همکاران در سال ۲۰۱۳ روشی را برای تعیین تأخیر ناشی از شتاب (کاهنده و افزایشنده) اتوبوس در ایستگاه پیشنهاد دادند [۱۰]. آن‌ها از اطلاعات خط سیر اتوبوس (با فاصله زمانی ۱۰ ثانیه بین هر دو مشاهده GPS) برای تعیین شتاب اتوبوس هنگام ورود به ایستگاه و خروج از آن استفاده کردند. در واقع شن و همکاران فرض کردند که حرکت اتوبوس در هنگام ورود و خروج، یک حرکت با شتاب ثابت است. در پژوهش حاضر، محققان فرض مشابهی در مورد حرکت اتوبوس در نظر می‌گیرند، یعنی فرض بر این است که تغییر سرعت اتوبوس در ایستگاه، با شتاب ثابت انجام می‌شود (شکل (۱)).

**فرض (۱):** در هر گذر اتوبوس از کمان، اتوبوس قبل از رسیدن به محدوده ایستگاه و بعد از ترک محدوده ایستگاه



شکل ۱- تغییر سرعت اتوبوس در هنگام ورود به ایستگاه و خروج از آن

مشخص نیست (مشاهدات سامانه موقعیت یاب هر دو دقیقه یک بار است). برای حل این مشکل از سرعت متوسط دسته مشاهدات اتوبوس استفاده می‌شود. از طرف دیگر سرعت متوسط اتوبوس به میزان توقف در ایستگاه اتوبوس و تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی بستگی دارد. از آنجایی که این دو متغیر ماهیتی کاملاً تصادفی دارند، سرعت متوسط معیار مناسبی برای شرایط ترافیکی نیست. برای مثال در شرایط ترافیکی یکسان، ممکن است یک اتوبوس تأخیر ۱۲۰ ثانیه‌ای پیش از چراغ راهنمایی تجربه کند و یا هیچ تأخیری پیش از چراغ نداشته باشد. برای حل مشکلات اخیر پیشنهاد می‌شود تا تأخیر ناشی از توقف اتوبوس در ایستگاه و همچنین تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی از سرعت متوسط دسته مشاهدات اتوبوس حذف شود. در صورتی که در محاسبه سرعت متوسط دسته مشاهدات اتوبوس، اثر توقف کامل اتوبوس در ایستگاه و صف چراغ راهنمایی حذف شود، کمیت حاصل «سرعت متوسط اتوبوس متحرک در کمان»  $\bar{v}_{mob}(O_b^{l,t})$  نامیده می‌شود. سرعت متوسط اتوبوس متحرک در کمان، به عنوان متغیر ترافیکی در نظر گرفته می‌شود. سرعت متوسط اتوبوس متحرک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{v}_{mob}(O_b^{l,t}) = \frac{\sum_{i=1}^n (Length(O^{P_i, P_{i+1}}) - X_q(O^{P_i, P_{i+1}}))}{\sum_{i=1}^n (Duration(O^{P_i, P_{i+1}}) - d(O^{P_i, P_{i+1}})) - (T_3 - T_2)} \quad (4)$$

$$, O^{P_i, P_{i+1}} \in O_b^{l,t}$$

فاصله طی شده در زمان سفر  $Length(O^{P_i, P_{i+1}})$  و  $O^{P_i, P_{i+1}}$  و  $Duration(O^{P_i, P_{i+1}})$  اختلاف زمان شروع و پایان مشاهده  $(t_{i+1} - t_i)$  است. در این معادله  $X_q(O^{P_i, P_{i+1}})$  و  $d(O^{P_i, P_{i+1}})$  به ترتیب مسافت و مدت زمانی است که اتوبوس در مدت زمان مشاهده  $O^{P_i, P_{i+1}}$  در صف چراغ راهنمایی طی کرده است.

پیش از این فرض شد که تأخیر ایستگاه اتوبوس وابسته به وضعیت ترافیک است. با فرض داشتن  $n$  وضعیت ترافیکی مختلف،  $n$  تأخیر مختلف برای هر ایستگاه وجود خواهد داشت. برای تعیین تأخیر ایستگاه اتوبوس، باید فرض شود که سرعت متوسط اتوبوس متحرک در کمان (به عنوان متغیر وضعیت ترافیکی)، دارای  $n$  مقدار است. از آنجایی که  $\bar{v}_{mob}(O_b^{l,t})$  یک متغیر پیوسته است این فرض با واقعیت همخوانی ندارد. برای حل این مشکل، سرعت

برای تعیین تأخیر ناشی از شتاب کاهنده  $(\delta_a)$  و تأخیر ناشی از شتاب افزایشنده  $(\delta_a)$  باید  $T_1$  و  $T_4$  مشخص شوند  $(T_2$  و  $T_3$  معلوم هستند). با داشتن  $T_1$  و  $T_4$ ، مقدار  $\delta_a$  و  $\delta_a$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta_a = \frac{1}{2}(T_2 - T_1) \quad \text{یا} \quad T_1 = T_2 - 2\delta_a \quad (2)$$

$$\delta_a = \frac{1}{2}(T_4 - T_3) \quad \text{یا} \quad T_4 = 2\delta_a + T_3 \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (۲) و رابطه (۳)، امکان تعیین معادله سرعت اتوبوس بر اساس تأخیر ایستگاه به وجود می‌آید. چنانچه پیش از این گفته شد، تأخیر اتوبوس باید بر اساس شرایط ترافیکی محاسبه شود. برای این منظور شرایط ترافیکی باید به عنوان یک متغیر در تعیین تأخیر ایستگاه وارد شود. در اینجا نیاز است تا تعاریف جدیدی ارائه شود:

- مشاهده سامانه موقعیت یاب  $O^{P_i}$ : مشاهده سامانه موقعیت یاب شامل مختصات مکانی  $(\phi$  و  $\lambda)$  و زمان برداشت مختصات  $(t)$  است. در صورتی که فاصله یک نقطه از یک تقاطع اختیاری به عنوان مختصات مکانی مشاهده  $(x_i)$  در نظر گرفته شود، هر مشاهده به صورت زوج مرتب  $O^{P_i}(x_i, t_i)$  قابل تعریف است.

- مشاهده زمان سفر  $O^{P_i, P_{i+1}}$ : یک مشاهده زمان سفر، دو مشاهده متوالی  $O^{P_i}$  و  $O^{P_{i+1}}$  از سامانه موقعیت یاب یک اتوبوس است (شکل (۱)). در این متن همواره منظور از «مشاهده»، مشاهده زمان سفر است.

- دسته مشاهدات اتوبوس  $O_b^{l,t}$  و دسته مشاهده  $O^{l,t}$ : منظور از دسته مشاهدات اتوبوس  $O_b^{l,t}$  مجموعه مشاهدات زمان سفر است که اتوبوس  $b$  در یک گذر از کمان  $l$  در بازه زمانی  $t$  تهیه می‌کند و دسته مشاهده  $O^{l,t}$  مجموعه تمام مشاهداتی است که اتوبوس‌ها در بازه زمانی  $t$  از کمان  $l$  تهیه می‌کنند. یک مشاهده زمان سفر  $O^{P_i, P_{i+1}}$  در صورتی جز مشاهدات کمان  $l$  است که اتوبوس قسمتی یا تمام زمان بین دو مشاهده  $O^{P_i}$  و  $O^{P_{i+1}}$  را در کمان  $l$  گذرانده باشد.

سرعت متوسط اتوبوس در کمان می‌تواند معیار نسبتاً مناسبی برای وضعیت ترافیک باشد. در وضعیت ترافیک سنگین، سرعت متوسط اتوبوس در کمان، کمتر از وضعیت روان ترافیکی خواهد بود. با این حال انتخاب سرعت متوسط اتوبوس در کمان به عنوان معیاری برای وضعیت ترافیک با مشکلاتی همراه است. اولین مشکل این است که زمان دقیق ورود اتوبوس به کمان و خروج آن از کمان

رابطه (۵) تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس را برای مشاهده  $O^{P_i, P_{i+1}}$  مشخص می‌کند. در پاره‌ای از اوقات نیاز به داشتن تأخیر ناشی از ایستگاه بین دو زمان  $t_n$  و  $t_m$  برای یک مشاهده وجود دارد. در چنین حالتی از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$\delta^c(O^{P_i, P_{i+1}}, t_m, t_n) = \begin{cases} \delta^{c_1}(t_m, t_n) & \text{if } B^0 \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^1 \\ \delta^{c_2}(t_m, t_n) & \text{if } B^1 \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^2 \\ \vdots & \vdots \\ \delta^{c_n}(t_m, t_n) & \text{if } B^{n-1} \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^n \end{cases} \quad (7)$$

### ۵- محاسبه سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس و طول صف چراغ راهنمایی برای بازه‌های زمانی پیشین (تاریخی)

در این بخش نحوه محاسبه زمان سفر کمان برای اتوبوس برای بازه‌های زمانی تاریخی معرفی می‌شود. در واقع با فرض موجود بودن داده‌های اتوبوس‌های کاوشگر و زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی برای دوره‌ای از زمان گذشته (برای مثال چند روز مشخص که  $D_{historical}$  نامیده می‌شود)، زمان سفر در آن دوره زمانی محاسبه می‌شود. به طوری که در بخش‌های آتی آورده می‌شود، محاسبه زمان سفر در بازه‌های زمانی گذشته، برای محاسبه آنی و پیش‌بینی زمان سفر مورد نیاز است.

در بخش ۴، نحوه محاسبه تأخیر یک مشاهده زمان سفر معرفی شد. رابطه (۴) به  $X_q$ ،  $d$  و  $v_{out}$  وابسته است. هدف در این مرحله این است که با در نظر گرفتن تأخیر ناشی از چراغ راهنمایی و با استفاده از مشاهداتی که در یک بازه زمانی از یک کمان دریافت می‌شود، سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس‌ها برای همان بازه زمانی محاسبه شود. برای تعیین مقدار تأخیر اتوبوس در صف چراغ راهنمایی، از معادلات صف در تئوری ترافیک استفاده می‌شود [۶]:

$$n(t) = \begin{cases} n_0 + q \times t & \text{if } t < t_r \\ n_0 + q \times t - s \times (t - t_r) & \text{if } t \geq t_r \end{cases} \quad (8)$$

رابطه (۸) اساس تحلیل‌های مکانی-زمانی در این پژوهش است. در این معادلات  $n_0$  طول صف اولیه در هنگام قرمز شدن چراغ،  $q$  جریان ترافیک وارد شونده به کمان (بر حسب خودرو بر ثانیه)،  $t$  زمان طی شده از

متوسط اتوبوس متحرک گسسته‌سازی می‌شود. در واقع با تشکیل  $n$  بازه مختلف برای سرعت متوسط اتوبوس متحرک، هر مقدار این متغیر در یکی از این بازه‌ها قرار می‌گیرد. در صورتی که تعداد بازه‌ها برابر  $n$  باشد، مجموعه  $B = \{B^0, B^1, \dots, B^n\}$  شامل  $n + 1$  عضو، مرزهای بازه‌ها را مشخص می‌کند. با این توضیحات، تابع تأخیر مشاهدات به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta^c(O^{P_i, P_{i+1}}) = \begin{cases} \delta^{c_1}(t_i, t_{i+1}) & \text{if } B^0 \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^1 \\ \delta^{c_2}(t_i, t_{i+1}) & \text{if } B^1 \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^2 \\ \vdots & \vdots \\ \delta^{c_n}(t_i, t_{i+1}) & \text{if } B^{n-1} \leq \bar{v}_{mob}(O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})) < B^n \end{cases} \quad (5)$$

$O_b^{lt}(O^{P_i, P_{i+1}})$  به معنی دسته مشاهدات است به طوریکه  $O^{P_i, P_{i+1}}$  عضو  $O_b^{lt}$  باشد.

$\delta^{c_k}(t_i, t_{i+1})$ ،  $c \in \{1, 2, \dots, n\}$  تابع تأخیر برای یک وضعیت ترافیکی ( $k$  امین وضعیت ترافیکی) است. در صورتی که اتوبوس بین  $t_i$  و  $t_{i+1}$  بدون کاهش سرعت (با سرعت  $v_{out}$ ) به حرکت خود ادامه می‌داد، به اندازه  $v_{out} \times (t_{i+1} - t_i)$  جابجایی می‌داشت. با این حال در شرایطی که اتوبوس با سرعت  $v^c(t)$  حرکت می‌کند، جابجایی اتوبوس بین  $t_i$  و  $t_{i+1}$  برابر  $\int_{t_i}^{t_{i+1}} v^{c_k}(t) d(t)$  است. با این توضیحات تابع تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس بین  $t_i$  و  $t_{i+1}$  با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\delta^{c_k}(t_i, t_{i+1}) = (t_{i+1} - t_i) - \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} v^{c_k}(t) d(t)}{v_{out}} \quad (6)$$

$v^{c_k}(t)$  تابع سرعت اتوبوس است؛ این اتوبوس تأخیر  $\delta_d^{c_k}$  و  $\delta_a^{c_k}$  ( $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) را در هنگام ورود به ایستگاه و خروج از آن تجربه می‌کند. با تشکیل معادلات رابطه (۵) برای همه مشاهدات تاریخی، امکان تخمین مجهولات این معادله وجود دارد. برای این کار از برآورد کننده کمترین مربعات و روش ضرایب لاگرانژ استفاده می‌شود [۱۱]. این مجهولات به صورت  $\delta_a^{c_k}$  و  $\delta_d^{c_k}$  ( $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) برآورد می‌شوند. لازم به یادآوری است که به دلیل مجهول بودن برخی از متغیرها، امکان محاسبه  $\delta_a^{c_k}$  و  $\delta_d^{c_k}$  در مرحله فعلی وجود ندارد. نحوه محاسبه متغیرهای مجهول و پارامترهای تأخیر ایستگاه در بخش ۶ معرفی می‌شود.

ایت توضیحات و معادله (۹)، معادلات زیر را برای مشاهده می‌توان تشکیل داد:

$$\begin{aligned} x(t_1) - x(t_2) &= L_w + L_m \Rightarrow \\ x(t_1) - x(t_2) &= s_m \times (T^g(t_2) - T^g(t_j)) + \\ v_{out} \times (T(t_j) - T(t_1)) - \delta^c(O^{P_i, P_{i+1}}, t_1, t_j) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x(t_1) - L_w &= n(T(t_j)) \Rightarrow \\ x(t_1) - v_{out} \times (T(t_j) - T(t_1)) - \delta^c(O^{P_i, P_{i+1}}, t_1, t_j) & \\ = n_0 + q_m \times T(t) - s_m \times T^g(t_j) \end{aligned} \quad (11)$$

در این معادلات  $\delta^c(O^{P_i, P_{i+1}}, t_1, t_j)$  برابر تأخیری است که مشاهده  $O^{P_i, P_{i+1}}$  بین زمان‌های  $t_1$  و  $t_j$ ، به خاطر ایستگاه و قبل از ورود به صف تجربه کند (رابطه (۷)).

در هنگام تشکیل معادله مشاهدات فرض بر این است که ایستگاه اتوبوس تنها در حرکت خارج از صف ایستگاه اتوبوس تأثیرگذار است؛ این به آن معناست که چنانچه ایستگاه اتوبوس در مکانی در مجاورت صف چراغ راهنمایی باشد، از قسمتی یا از تمام تأخیر ایستگاه اتوبوس صرف نظر می‌شود. علت این فرض آن است که تفکیک تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس از تأخیر و توقف ناشی از صف چراغ راهنمایی امری دشوار است. با استفاده از مشاهده  $O^{P_1, P_2}$ ، امکان تشکیل معادلات رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) وجود دارد.  $q_m, s_m, v_{out}, n_0$  و  $t_j$  مجهولات این معادله هستند. برای تعیین پارامترهای  $q_m$  و  $s_m$  می‌توان از اطلاعات سامانه‌های مجهز به سنجنده‌های الکترومغناطیسی استفاده کرد. در صورت وجود اطلاعات چنین سامانه‌هایی، تمام پارامترهای مورد نیاز در معادلات معین است و امکان استفاده از معادلات، برای تخمین تأخیر و سرعت خارج از ایستگاه کمان فراهم است. در بسیاری از شهرهای جهان سامانه‌ای برای تعیین حجم جریان در معابر شریانی وجود ندارد. در چنین شرایطی یک راه این است که از محاسبه سهم تأخیر چراغ راهنمایی در هر مشاهده چشم‌پوشی شود. با توجه به اهمیت تعیین تأخیر چراغ در هنگام استفاده از کاوشگر اتوبوس، به نظر می‌رسد این چشم‌پوشی دقت نتایج حاصل از کاوشگر اتوبوس را کاهش دهد. راه دیگر این است که با استفاده از داده‌های کاوشگر اتوبوس و استفاده از معادلات مشاهدات، به تخمینی از این پارامترها رسید. در واقع به نظر می‌رسد با استفاده از داده‌های کاوشگر اتوبوس و استفاده از اطلاعات زمان‌بندی چراغ راهنمایی،

شروع چراغ قرمز و  $s$  جریان خارج شونده از کمان در هنگام سبز شدن چراغ (بر حسب خودرو بر ثانیه) است.  $t_r$  نیز طول چراغ قرمز است. چنانچه  $q_m$  جریان وارد شونده به کمان بر حسب متر بر ثانیه و  $s_m$  جریان گذرنده از چراغ در هنگام چراغ سبز بر حسب متر بر ثانیه باشد، امکان تشکیل معادله صف بر حسب واحد طول (متر) وجود دارد. در این پژوهش،  $q_m$  و  $s_m$  «کمیت‌های حجم ترافیک کمان» نامیده می‌شوند. رابطه (۸) را به صورت رابطه (۹) نیز می‌توان بازنویسی کرد. یک سیکل چراغ راهنمایی شامل یک چراغ قرمز و یک چراغ سبز است و هر سیکل با شروع چراغ قرمز شروع می‌شود. در صورت معلوم بودن  $n_0$  در شروع یک سیکل چراغ راهنمایی و ثابت بودن  $q_m$  و  $s_m$  در سیکل‌های بعدی، با استفاده از رابطه (۹)، امکان محاسبه طول صف برای سیکل‌های دوم، سوم و ... وجود دارد.

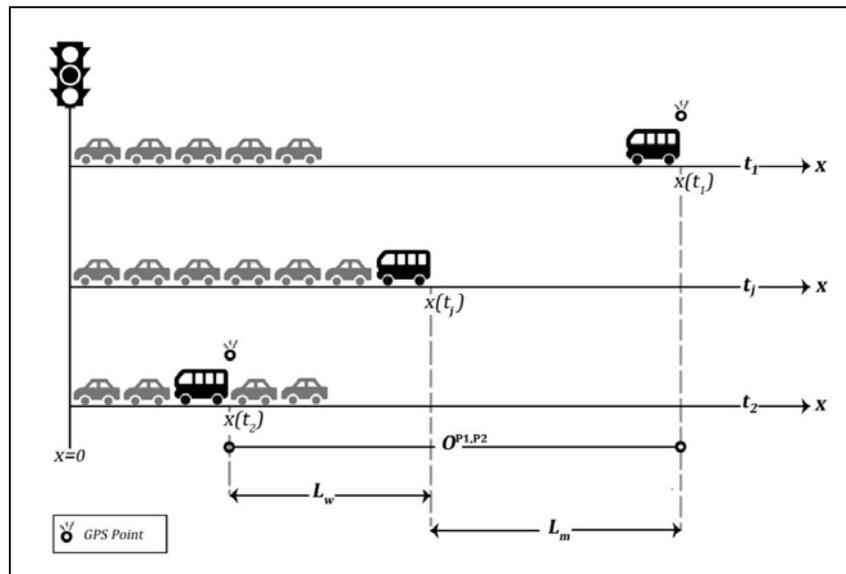
$$n(T) = n_0 + q_m \times T - s_m \times T^g \quad (9)$$

$T$  زمان گذشته از شروع اولین سیکل است.  $T^g$  مجموع زمان‌هایی است که بعد شروع اولین سیکل، چراغ راهنمایی سبز بوده است. با فرض معلوم بودن کمیت‌های حجم ترافیک در رابطه (۹)، با داشتن طول صف اولیه  $n_0$ ، امکان محاسبه طول صف چراغ راهنمایی در هر لحظه از زمان وجود دارد. در صورتی که سرعت خارج از ایستگاه یک کمان نیز معلوم باشد ( $v_{out}$ )، زمان سفر کمان برای اتوبوس را می‌توان تعیین نمود. از این رو کمیت‌های  $n_0$  و  $v_{out}$  «کمیت‌های زمان سفر کمان» نام‌گذاری می‌شود. در ادامه نحوه استفاده از مشاهدات کاوشگر برای محاسبه کمیت‌های زمان سفر بررسی می‌شود. مشاهده  $O^{P_1, P_2}$  در شکل (۲) حالت خاصی از مشاهدات ممکن در یک کمان است. این مشاهده شامل دو نقطه  $P_1$  و  $P_2$  است. اتوبوس در زمان  $t_1$  در فاصله  $x(t_1)$  از چراغ قرار دارد؛ بعد از آن اتوبوس در زمان  $t_2$  به صف چراغ راهنمایی می‌رسد و در زمان  $t_2$  در فاصله  $x(t_2)$  از چراغ، داخل صف چراغ راهنمایی قرار می‌گیرد.  $T(t)$  و  $T^g(t)$  تابع انتقال زمان از سیستم زمانی مرجع به سیستمی هستند که مبدأ آن منطبق با زمان شروع اولین سیکل ( $T = 0$ ) است.  $L_m$  برابر مسافتی است که اتوبوس تا رسیدن به صف چراغ راهنمایی طی کرده است و  $L_w$  برابر مسافتی است که اتوبوس در صف چراغ راهنمایی طی کی کند. با توجه به

بتوان تا حد زیادی پارامترهای تقاطع و کمان را تخمین زده و میزان تأخیر چراغ را مشخص کرد.

هافلینتر در سال ۲۰۱۲ برای تعیین تابع توزیع تأخیر چراغ راهنمایی فرض کرد که جریان وارد شونده به یک کمان دارای توزیع یکنواخت است [۸ و ۹]. او همچنین فرض کرد که متوسط جریان وارد شونده به یک کمان و جریان خارج شونده از آن از یک الگوی تاریخی پیروی می‌کنند. او فرض کرد که در بازه‌های زمانی مشخص، این پارامترها مقدار

ثابتی دارند (برای مثال ساعت ۱۱ الی ۱۱:۱۵). با این مفروضات، امکان محاسبه پارامترهای معادلات تشکیل صف و به تبع آن تعیین تأخیر چراغ راهنمایی وجود دارد. اگرچه دقت تخمین پارامترهای حجم ترافیک کمان به صورت غیر مستقیم احتمالاً پایین‌تر از دقت مشاهده مستقیم آن‌ها است، با این حال صرف تعیین حدودی تأخیر اتوبوس پیش از چراغ راهنمایی، کمک زیادی به تعیین دقیق‌تر زمان سفر کمان برای خودروها می‌کند.



شکل ۲- وضعیت مشاهده زمان سفر در هنگام مواجهه با چراغ راهنمایی

شروع اولین سیکل چراغ راهنمایی در یک بازه زمانی است.

فرض (۲) مشخص می‌کند که  $q_m$  و  $s_m$  در بازه‌های زمانی مشابه مقداری برابر دارند. برای مثال در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۰:۱۵ روزهای یکشنبه و دوشنبه مقدار این کمیت برابر است. البته توجه شود که فرض ۳ در رابطه با ثابت بودن  $v_{out}$  در بازه‌های مشابه گزاره‌ای ارائه نمی‌کند. در واقع مقادیر  $v_{out}$  برای هر بازه زمانی مقداری منحصر به فرد دارد. به طور کلی متغیرهای  $v_{out}$  و  $n_0$  برای هر بازه زمانی مقادیر منحصر به فردی دارند و الزاماً در بازه‌های زمانی مشابه، برابر نیستند.

## ۵-۱- معادلات مشاهدات یک کمان در یک بازه زمانی

معادلات رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) تنها مربوط به حالت خاصی از مشاهدات هستند. در شکل (۲) هر دو مشاهده سامانه موقعیت‌یاب در یک کمان قرار دارند و

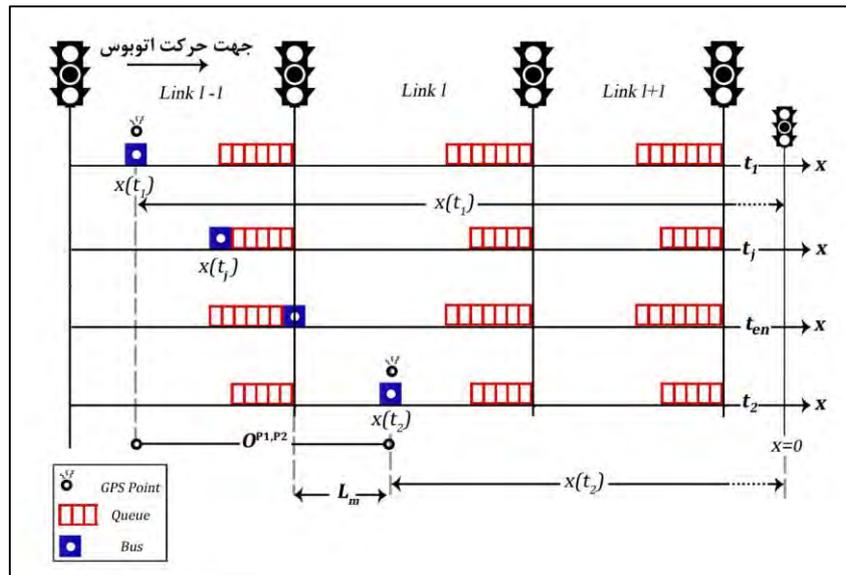
با این توضیحات، مؤلفان در تحقیق حاضر نیز مفروضات مشابهی با مفروضات ذکر شده در تحقیقات هافلینتر مطرح می‌کنند.

**فرض (۲):**  $q_m$  و  $s_m$  در یک کمان، در تمام طول یک بازه زمانی ثابت هستند. یک بازه زمانی  $\Delta t^{t,d}$  با یک دوگانه  $(t, d)$  مشخص می‌شود که  $t$  نشانگر  $t$  امین بازه زمانی در روز و  $d$  نشانگر روزی است که بازه زمانی در آن قرار دارد. بازه‌های زمانی که  $t$  یکسانی دارند «بازه‌های زمانی مشابه» نامیده می‌شوند. علاوه بر این فرض می‌شود  $q_m$  و  $s_m$  در بازه‌های زمانی مشابه مقدار ثابتی دارند. مجموعه  $\Delta T_s^t = \{\Delta t^{t,d} | d \in D_{historical}\}$  مجموعه بازه‌های زمانی مشابه در بازه زمانی  $t$  نامیده می‌شود.

**فرض (۳):**  $v_{out}$  در تمام طول یک بازه زمانی ثابت است. **فرض (۴):** در این پژوهش، کمیت‌های زمان سفر  $(n_0$  و  $v_{out})$  برای بازه‌های زمانی با طول مشخص محاسبه می‌شود.  $n_0$  طول صف پیش از چراغ راهنمایی در لحظه

مشاهده‌ای حالات دیگری از مشاهدات زمان سفر نیز وجود دارد. شکل (۳) یکی دیگر از این حالات را نشان می‌دهد.

مشاهده اول خارج از صف چراغ راهنمایی و مشاهده دوم داخل صف چراغ راهنمایی است. علاوه بر چنین



شکل ۳- حالت خاصی از مشاهدات کاوشگر

بنابراین با در نظر گرفتن تعداد متغیرها و حالات مختلف ممکن، با معادلاتی کاملاً ناپیوسته روبرو هستیم. این ناپیوستگی حل دستگاه معادلات را با دشواری روبرو ساخته است. علاوه بر این، بررسی وجود و یا عدم وجود جواب برای دستگاه معادله بسیار دشوار خواهد بود. راه حل پیشنهادی مؤلفان، استفاده از مقادیری تخمینی برای متغیرهای کمان‌های همسایه است. با داشتن مقادیر  $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$  برای کمان‌های همسایه یک کمان در یک بازه زمانی، تعداد مجهولات دستگاه معادلات مشاهدات، همواره برابر با چهار مجهول ( $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$ ) است. در صورتی که در یک بازه زمانی به تعداد کافی مشاهده از کاوشگر موجود باشد (حداقل چهار مشاهده با شرایطی خاص)، امکان محاسبه چهار متغیر  $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$  در آن بازه زمانی وجود دارد. با این حال معمولاً تعداد کافی مشاهده در یک بازه زمانی برای محاسبه چهار متغیر مجهول وجود ندارد. در این شرایط با استفاده از فرض (۲)، امکان کاهش تعداد مجهولات وجود دارد. بر مبنای این فرض،  $q_m$  و  $s_m$  در بازه‌های زمانی مشابه با هم برابر هستند. بنابراین در صورتی که معادلات مشاهدات مربوط به تمام بازه‌های زمانی مشابه به صورت همزمان تشکیل شود، امکان محاسبه  $q_m$  و  $s_m$  از طریق حل این معادلات وجود دارد.

در این پژوهش مشاهدات زمان سفر به هشت حالت کلی تقسیم بندی شده است (فهرست کامل این حالات به همراه معادلات و توضیحات در [۱۲] وجود دارد). برای مثال در شکل (۳) معادله مشاهده به صورت زیر خواهد بود:

$$L_m = v_{out}^l \times (T(t_2) - T(t_{en}) - \delta^c(O^{P_1, P_2}, t_{en}, t_2)) \quad (12)$$

در این شکل قسمتی از مشاهده زمان سفر در خارج از کمان  $l$  قرار دارد (در کمان  $l-1$ ). در چنین حالتی معادله مشاهده  $O^{P_1, P_2}$  بر حسب متغیرهای کمان  $l$  و کمان‌های دیگر است. بنابراین در صورت مجهول فرض کردن  $v_{out}$ ،  $n_0$  برای دیگر کمان‌ها (و همچنین مجهول فرض کردن  $q_m$  و  $s_m$ )، در هنگام تشکیل معادلات مشاهدات برای هر کمان، تعداد زیادی متغیر مجهول وجود خواهد داشت. در این‌جا برای حل این مشکل با چند گزینه مواجه خواهیم شد. اولین گزینه این است که معادلات مربوط به مشاهدات تمام کمان‌ها به صورت همزمان تشکیل شود و با حل دستگاه معادلات، مجهولات به صورت همزمان محاسبه شوند. این راه حل با مشکلاتی همراه است؛ همان‌طور که در متن بخش ۴ اشاره شده است، بسته به وضعیت مشاهدات، معادلات متفاوتی برای مشاهدات وجود خواهد داشت. از طرفی انتخاب این معادلات به نیز خود به مقدار متغیرها بستگی دارد.

## ۵-۲- تشکیل و حل دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه

منظور از تشکیل دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه، ایجاد دستگاه معادلاتی است که معادلات آن با استفاده از مشاهدات کاوشگر در تعدادی از بازه‌های زمانی مشابه  $\Delta T_s^t$  تشکیل شده‌اند. برای مثال برای تشکیل این دستگاه می‌توان از تمام مشاهدات صورت گرفته در بازه زمانی بین ساعت ۱۱:۱۵ الی ۱۱:۳۰ روزهای یکشنبه تا چهارشنبه در یک هفته استفاده کرد. هدف از تشکیل معادلات مشاهدات در بازه‌های زمانی مشابه، تعیین همزمان کمیت‌های زمان سفر ( $n_0$  و  $v_{out}$ ) و کمیت‌های حجم ترافیک کمان ( $q_m$  و  $s_m$ ) در بازه‌های زمانی مشابه پیشین (با استفاده از داده‌های تاریخی) است. مزیت حل همزمان دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه نسبت به حل جداگانه معادلات برای هر بازه زمانی در این است که می‌توان از داده‌های  $n$  بازه زمانی مشابه برای تخمین  $q_m$  و  $s_m$  استفاده کرد ( $n \leq |\Delta T_s^t|$ ). بنابر فرض (۲)،  $q_m$  و  $s_m$  در بازه‌های زمانی مشابه مقدار برابری دارند. با توجه به اینکه تعداد مجهولات زمان سفر ( $v_{out}$  و  $n_0$ ) برای هر بازه زمانی برابر ۲ است و حجم ترافیک ( $q_m$  و  $s_m$ ) برای همه بازه‌های مشابه برابر است، تعداد مجهولات دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه برابر  $2n + 2$  است. دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه به صورت رابطه (۱۳) است.

$$\left\{ \begin{array}{l} f^1(v_{out}^{l,\Delta t,d1}, n_0^{l,\Delta t,d1}, q_m^{l,\Delta t,d1}, s_m^{l,\Delta t,d1}) = \varepsilon_1 \\ f^2(v_{out}^{l,\Delta t,d1}, n_0^{l,\Delta t,d1}, q_m^{l,\Delta t,d1}, s_m^{l,\Delta t,d1}) = \varepsilon_2 \\ \vdots \\ f^m(v_{out}^{l,\Delta t,d1}, n_0^{l,\Delta t,d1}, q_m^{l,\Delta t,d1}, s_m^{l,\Delta t,d1}) = \varepsilon_m \\ f^{m+1}(v_{out}^{l,\Delta t,d2}, n_0^{l,\Delta t,d2}, q_m^{l,\Delta t,d2}, s_m^{l,\Delta t,d2}) = \varepsilon_{m+1} \\ f^{m+2}(v_{out}^{l,\Delta t,d2}, n_0^{l,\Delta t,d2}, q_m^{l,\Delta t,d2}, s_m^{l,\Delta t,d2}) = \varepsilon_{m+2} \\ \vdots \\ f^{m+s}(v_{out}^{l,\Delta t,d2}, n_0^{l,\Delta t,d2}, q_m^{l,\Delta t,d2}, s_m^{l,\Delta t,d2}) = \varepsilon_{m+s} \\ \vdots \\ f^p(v_{out}^{l,\Delta t,dn}, n_0^{l,\Delta t,dn}, q_m^{l,\Delta t,dn}, s_m^{l,\Delta t,dn}) = \varepsilon_p \\ f^{p+1}(v_{out}^{l,\Delta t,dn}, n_0^{l,\Delta t,dn}, q_m^{l,\Delta t,dn}, s_m^{l,\Delta t,dn}) = \varepsilon_{p+1} \\ \vdots \\ f^{p+w}(v_{out}^{l,\Delta t,dn}, n_0^{l,\Delta t,dn}, q_m^{l,\Delta t,dn}, s_m^{l,\Delta t,dn}) = \varepsilon_{p+w} \\ q_m^{l,\Delta t,d1} = q_m^{l,\Delta t,d2} = \dots = q_m^{l,\Delta t,dn} \\ s_m^{l,\Delta t,d1} = s_m^{l,\Delta t,d2} = \dots = s_m^{l,\Delta t,dn} \end{array} \right. \quad (13)$$

برای حل این دستگاه با استفاده از برآورد کننده کمترین مربعات، باید مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱۴) حل شود.

$$\min \sum_{j=1}^{p+w} \varepsilon_j^2 \quad (14)$$

با توجه به پیچیدگی و ناپیوستگی معادلات، در حال حاضر امکان ارائه روشی تحلیلی برای تخمین مجهولات وجود ندارد. در پژوهش حاضر، برای حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱۴) از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک، سادگی پیاده‌سازی این الگوریتم و همچنین قدرت بالای این روش در تعامل با توابع ناپیوسته است. نکته مهمی که باید در این‌جا مورد توجه قرار گیرد انتخاب  $n$  است. اگرچه با افزایش تعداد بازه‌های زمانی مشابه مورد استفاده در تخمین، دقت برآورد  $q_m$  و  $s_m$  افزایش می‌یابد، با این حال تخمین مجهولات، به دلیل افزایش تعداد آن‌ها دشوارتر می‌شود. به طور کلی با افزایش تعداد متغیرها، احتمال کاهش عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری افزایش می‌یابد. بنابراین بهتر است برای  $n$  از اعداد کوچک، برای مثال ۳ یا ۴، استفاده شود.

در هنگام تشکیل دستگاه معادلات مشاهدات بازه‌های زمانی مشابه (رابطه (۱۳))،  $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$  برای کمان‌های همسایه معلوم فرض شده است. در واقع بر مبنای معلوم فرض کردن این متغیرها امکان حل دستگاه رابطه (۱۳) فراهم می‌شود. سوالی که در این‌جا مطرح می‌شود آن است که چگونه مقادیر  $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$  برای کمان‌های همسایه تخمین زده شوند. نحوه تعیین این متغیرها در ادامه مشخص می‌شود.

## ۵-۳- تخمین اولیه کمیت‌های حجم ترافیک و سری‌های زمانی زمان سفر

برای حل دستگاه رابطه (۱۳)، به زمان سفر کمان‌های همسایه و کمیت‌های حجم ترافیک کمان‌های همسایه در بازه‌های زمانی مشابه  $\Delta T_s^t$  نیاز است. از آنجایی که مقدار کمیت‌های ذکر شده برای کمان‌های همسایه نامشخص است، این کمیت‌های مجهول برای کمان‌های همسایه تقریب زده می‌شوند. نحوه تقریب به این صورت است که زمان سفر و کمیت‌های حجم ترافیک کمان‌های همسایه برای بازه زمانی  $t$ ، برابر مقدار این کمیت‌ها در بازه زمانی

نامیده و با  $TS_{e1}^{qm,l}$  و  $TS_{e1}^{sm,l}$  نمایش داده می‌شود. برای استفاده از روش محاسبه زنجیره‌ای سری زمانی، نیاز به زمان سفر در اولین بازه زمانی است. در بخش ۵-۵، روش تعیین زمان سفر در اولین بازه زمانی معرفی می‌شود. در ادامه نحوه بهبود دقت سری‌های زمانی زمان سفر و حجم ترافیک کمان بررسی می‌شود.

#### ۴-۵- بهبود دقت سری‌های زمانی زمان سفر و حجم ترافیک کمان

در بخش ۵-۳، نحوه تشکیل سری‌های زمانی برای  $v_{out}$ ،  $n_0$ ،  $q_m$  و  $s_m$  برای یک کمان توضیح داده شد. برای تشکیل این سری‌های زمانی از روش محاسبه زنجیره‌ای سری زمانی استفاده شد و سری‌های  $TS_{e1}^{x,l}$  (منظور از  $TS_{e1}^{sm,l}$  و  $TS_{e1}^{qm,l}$ ،  $TS_{e1}^{v_{out},l}$ ،  $TS_{e1}^{n_0,l}$ ،  $TS_{e1}^{x,l}(t,d)$  برای کمان  $l$  محاسبه گردید. برای محاسبه همسایه در بازه قبلی استفاده شده است (یعنی  $TS_{e1}^{x,l}(t,d)$ ،  $TS_{e1}^{x,l\pm k}(t-1,d)$ ،  $k \neq 0$  در صورتی که برای محاسبه  $TS_{e1}^{x,l}(t,d)$  باید از زمان سفر و کمیت‌های حجم کمان‌های همسایه در بازه زمانی  $t$  استفاده شود (یعنی  $TS_{e1}^{x,l\pm k}(t,d)$ ،  $k \neq 0$ ). با تشکیل  $TS_{e1}^{x,l}$ ، زمان‌های سفر و کمیت‌های حجم کمان‌های همسایه در بازه زمانی  $t$  (یا به عبارتی  $TS_{e1}^{x,l\pm k}(t,d)$ ،  $k \neq 0$ ) قابل دسترس است. استفاده از  $TS_{e1}^{x,l\pm k}(t,d)$ ، دقت برآورد زمان سفر کمان  $l$  را افزایش می‌دهد. در صورتی که در هنگام محاسبه زمان سفر کمان و کمیت‌های حجم  $l$  از  $TS_{e1}^{x,l\pm k}(t,d)$  استفاده شود (برای مثال  $TS_{e1}^{n_0,l+1}$  و  $TS_{e1}^{v_{out},l+1}$  یا  $TS_{e1}^{n_0,l-1}$  و  $TS_{e1}^{v_{out},l-1}$ )، امکان تشکیل سری زمانی جدیدی از زمان سفر برای کمان  $l$  و همچنین دیگر کمان‌ها به وجود می‌آید. این سری‌های زمانی جدید را که از طریق مشاهدات زمان سفر و همچنین استفاده از سری‌های مرتبه اول محاسبه شده است، «تخمین مرتبه دوم سری‌های زمانی کمان  $l$ » می‌نامیم و آن‌ها را با  $TS_{e2}^{n_0,l}$ ،  $TS_{e2}^{v_{out},l}$ ،  $TS_{e2}^{sm,l}$  و  $TS_{e2}^{qm,l}$  نمایش می‌دهیم. با توجه به توضیحات ارائه شده انتظار می‌رود که تخمین مرتبه دوم سری زمانی از دقت بالاتری نسبت به تخمین مرتبه اول برخوردار باشد. همچنین به طریق مشابه امکان تولید «تخمین مرتبه  $m$  سری زمانی زمان سفر کمان  $l$ » از

$t-1$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تغییرات نسبتاً نرم زمان سفر و حجم ترافیک، این فرض تا حد زیادی قابل قبول است. در این روش با فرض داشتن زمان سفر و کمیت‌های حجم ترافیک در همه کمان‌ها در اولین بازه زمانی، امکان محاسبه زمان سفر کمان‌ها و کمیت‌های حجم ترافیک در دومین بازه زمانی و با استفاده از مشاهدات دریافتی از دومین بازه زمانی وجود دارد. با استفاده از مقادیر تخمین زده شده برای کمیت‌های زمان سفر و حجم ترافیک کمان‌های همسایه و همچنین با استفاده از مشاهدات انجام شده از کمان  $l$  در بازه‌های زمانی مشابه دوم، امکان محاسبه کمیت‌های زمان سفر و حجم ترافیک کمان  $l$  برای بازه‌های زمانی مشابه دوم فراهم می‌شود. این عمل تا محاسبه زمان سفر برای آخرین بازه زمانی در داده‌های تاریخی ادامه می‌یابد. بعد از پایان این عملیات، زمان سفر کمان‌ها برای همه بازه‌های زمانی که از تعداد کافی مشاهده برخوردار هستند، محاسبه خواهد شد. در واقع یک سری زمانی از کمیت‌های زمان سفر خواهیم داشت. از آنجایی که در این روش، زمان سفر کمان‌ها به صورت زنجیره‌ای محاسبه می‌شود، این روش «محاسبه زنجیره‌ای سری‌های زمانی زمان سفر» نامیده می‌شود. در این حالت با وجود اینکه از مشاهدات هر بازه زمانی برای محاسبه زمان سفر کمان  $l$  ( $n_0$  و  $v_{out}$ ) برای کمان  $l$  در همان بازه زمانی استفاده شده است، به دلیل تقریب زمان سفر کمان‌های همسایه از طریق برابر فرض کردن آن‌ها با زمان سفر بازه زمانی قبلی، زمان سفر تخمین زده شده برای کمان  $l$ ، بهترین تخمین برای زمان سفر نیست. با این حال سری‌های زمانی حاصل، تقریب نسبتاً مناسبی از سری‌های زمانی زمان سفر در اختیار قرار می‌دهد. همچنین کمیت‌های حجم ترافیک کمان برای بازه‌های زمانی مختلف نیز محاسبه شده است که این مقادیر نیز دو سری زمانی تشکیل می‌دهند. سری‌های زمانی محاسبه شده برای زمان سفر کمان از طریق روش محاسبه زنجیره‌ای برای کمان  $l$ ، «تخمین مرتبه اول سری زمانی زمان سفر کمان  $l$ » نامیده می‌شود و با  $TS_{e1}^{n_0,l}$  و  $TS_{e1}^{v_{out},l}$  نمایش داده می‌شوند. مقدار یک سری زمانی در بازه زمانی  $(t,d)$  با  $TS_{e1}^{n_0,l}(t,d)$  و  $TS_{e1}^{v_{out},l}(t,d)$  نمایش داده می‌شود. سری‌های زمانی حاصل از مقادیر کمیت‌های حجم ترافیک در بازه‌های زمانی مختلف نیز «تخمین مرتبه اول سری زمانی حجم ترافیک کمان»

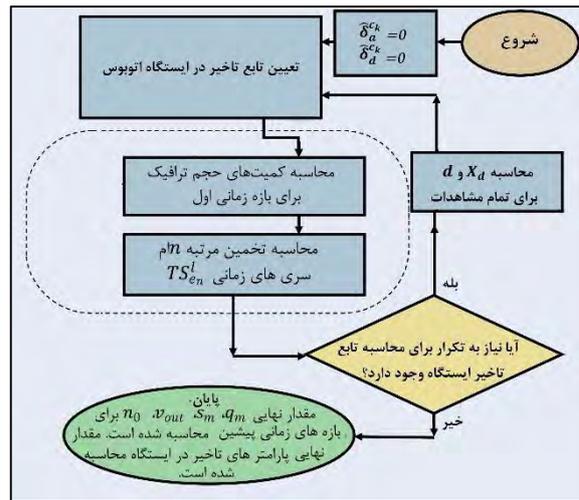
طریق تخمین مرتبه  $n - 1$  وجود دارد. توصیه مشخصی در رابطه با انتخاب  $n$  وجود ندارد ولی به نظر می‌رسد  $n = 4$  و یا  $n = 5$  گزینه‌های مناسبی برای تخمین دقیق‌تر سری‌های زمانی زمان سفر هستند.

### ۵-۵- تعیین زمان سفر در اولین بازه زمانی

آنطور که در بخش‌های قبل مطرح شد، برای محاسبه زنجیره‌ای سری‌های زمانی زمان سفر، از زمان سفر در اولین بازه زمانی هر روز استفاده می‌شود. علاوه بر این، کمیت‌های حجم ترافیک ( $q_m$  و  $s_m$ ) برای بازه‌های زمانی اول نیز باید مشخص شود. مسئله دیگری که در اینجا مطرح می‌شود آن است که اولین بازه زمانی در چه ساعتی از روز انتخاب شود. از آنجایی که اتوبوس‌های شهری از ساعت ۵:۳۰ شروع به سرویس‌دهی می‌کنند، می‌توان شروع اولین بازه زمانی را برابر با این ساعت در نظر گرفت. از آنجایی که تردد خودروها در این ساعت از روز بسیار پایین است، صف پیش از چراغ‌های راهنمایی در هنگام شروع فاز قرمز، به احتمال بسیار زیاد طولی برابر با صفر دارد. بنابراین می‌توان مقدار  $n_0$  را برای همه کمان‌ها در اولین بازه زمانی برابر با صفر در نظر گرفت. همچنین با توجه به تراکم بسیار پایین خودروها در این ساعت از روز، می‌توان مقدار سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس ( $v_{out}$ ) را برابر با سرعت مجاز حرکت در کمان در نظر گرفت. با این مفروضات، کمیت‌های زمان سفر در همه کمان‌ها در اولین بازه زمانی مشخص می‌شود. با داشتن  $v_{out}$  و  $n_0$  در بازه زمانی اول در همه کمان‌ها، امکان محاسبه  $q_m$  و  $s_m$  برای هر کمان فراهم می‌شود. برای محاسبه  $q_m$  و  $s_m$ ، دستگامعادلات مشاهدات دریافتی از کاوشگر اتوبوس برای هر کمان تشکیل داده شده و با داشتن  $v_{out}$  و  $n_0$  مقدار  $q_m$  و  $s_m$  تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که در تشکیل این دستگامعادلات برای هر کمان، امکان استفاده همزمان از مشاهدات بازه‌های زمانی اول در چند روز مختلف وجود دارد؛ در این صورت امکان تخمین دقیق‌تر  $q_m$  و  $s_m$  فراهم می‌شود. برای محاسبه  $q_m$  و  $s_m$  از برآورد کننده کمترین مربعات استفاده می‌شود. به دلیل مشخص بودن  $v_{out}$  و  $n_0$ ، بهینه‌سازی کمترین مربعات به سادگی و از طریق روش ضرایب لاگرانژ قابل انجام است.

### ۶- محاسبه تکراری پارامترهای توابع تأخیر در ایستگاه، کمیت‌های حجم ترافیک کمان و زمان سفر اتوبوس در کمان برای بازه‌های زمانی پیشین (تاریخی)

تا به اینجا روابط مربوط به محاسبه تأخیر چراغ راهنمایی و سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس تعیین شد. نکته‌ای که در این روابط حائز اهمیت است، وابستگی پارامترهای توابع تأخیر در ایستگاه و زمان سفر کمان در محاسبات است. در تشکیل معادلات مشاهدات (برای مثال رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱)) مقدار تأخیر ایستگاه اتوبوس مورد نیاز است. از طرفی برای تعیین پارامترهای تابع تأخیر ایستگاه با استفاده از مشاهدات زمان سفر (در رابطه (۴))، تأخیر چراغ راهنمایی ( $d$  و  $X_q$ ) باید معلوم باشد. برای حل این مشکل، در مرحله اول می‌توان برای تخمین زمان سفر، مقدار تأخیر ناشی از تغییر سرعت در ایستگاه اتوبوس را برابر صفر قرار داد ( $\delta_a^{ck} = 0$ ،  $\delta_a^{ck} = 0$  و  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ). در واقع با صفر در نظر گرفتن این متغیر، از تاثیر تغییرات سرعت در ایستگاه در محاسبه زمان سفر صرف نظر شده است. با این فرض، امکان تعیین زمان سفر کمان و به تبع آن  $d$  و  $X_q$  به وجود می‌آید. از آنجایی که در هنگام تعیین  $d$  و  $X_q$ ، تأخیر ناشی از ایستگاه اتوبوس هنوز به طور دقیق مشخص نیست، این دو متغیر هنوز به دقت نهایی خود نرسیده‌اند؛ با این حال با استفاده از  $d$  و  $X_q$  محاسبه شده،  $\delta_a^{ck}$  و  $\delta_a^{ck}$  ( $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) محاسبه می‌شوند. با تکرار چندین باره محاسبه تأخیر چراغ راهنمایی برای مشاهدات مختلف و محاسبه پارامترهای تأخیر ناشی از شتاب در ایستگاه اتوبوس، تأخیر چراغ راهنمایی و سرعت خارج از ایستگاه با حداکثر دقت ممکن یافت می‌شوند. شکل (۴) الگوریتم محاسبه سرعت خارج از ایستگاه و پارامترهای تقاطع را با استفاده از داده‌های تاریخی نمایش می‌دهد. این الگوریتم با استفاده از داده‌های تاریخی و برای همه بازه‌های زمانی اجرا می‌شود. بعد از اجرای الگوریتم،  $q_m$  و  $s_m$  برای تمام بازه‌های زمانی مشابه با حداکثر دقت ممکن در دسترس است.



شکل ۴- روند محاسبه پارامترهای حجم ترافیک، زمان سفر و تأخیر ایستگاه اتوبوس با استفاده از مشاهدات تاریخی

## ۷- محاسبه آنی و پیش‌بینی زمان سفر کمان

تا به اینجا نحوه محاسبه زمان سفر برای بازه‌های زمانی تاریخی معرفی شد. همان‌طور که گفته شد، سری‌های زمانی زمان سفر، از طریق یک روش تکراری تخمین زده می‌شود. با این حال سری‌های زمانی زمان سفر تنها برای بازه‌های پیشین (بازه‌های تاریخی) موجود است. از این رو،  $v_{out}$  و  $n_0$  در کمان‌های همسایه برای تشکیل معادلات مشاهدات در بازه زمانی جدید (آنی) در دسترس نیستند. در این پژوهش در هنگام محاسبه آنی زمان سفر، برای محاسبه  $v_{out}$  و  $n_0$  در کمان‌های همسایه، از مقادیر پیش‌بینی شده این متغیرها از طریق تحلیل سری‌های زمانی استفاده می‌شود. علاوه بر این اگرچه دلیل اولیه استفاده از روش‌های پیش‌بینی در این پژوهش محاسبه آنی زمان سفر است، این مسئله مزیت دیگری نیز با خود به همراه دارد. آن مزیت پیش‌بینی زمان سفر برای آینده است. با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی امکان پیش‌بینی زمان سفر بازه‌های زمانی آینده با استفاده از مشاهدات بازه زمانی فعلی فراهم می‌شود. پیش‌بینی زمان سفر برای بازه‌های زمانی آینده این امکان را به وجود می‌آورد که حتی بدون داشتن مشاهده زمان سفر در برخی از بازه‌های زمانی، به تخمینی از زمان سفر در آن بازه (و بر اساس مشاهدات بازه‌های قبل) دست یابیم. علاوه بر این، پیش‌بینی زمان سفر برای بازه‌های زمانی آینده، کاربردهای فراوانی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، از جمله محاسبه زمانمند مسیر دارد.

## ۷-۱- تحلیل حالت-وینترز برای پیش‌بینی سری‌های زمانی

در صورت داشتن یک سری زمانی، امکان پیش‌بینی آینده آن سری وجود دارد. پیش‌بینی یک سری زمانی به این معنی است که در صورت معلوم بودن مقادیر یک سری زمانی برای بازه‌های زمانی  $1$  تا  $t$ ، مقدار سری برای بازه‌های زمانی بزرگتر از  $t$  مشخص شود. برای پیش‌بینی یک سری زمانی ابتدا باید یک سری را تحلیل کرد، پارامترهای سری را مشخص کرده و سپس با استفاده از پارامترهای سری آینده سری را پیش‌بینی کرد. روش‌های مختلفی برای تحلیل یک سری زمانی وجود دارد. در روش پیشنهادی این پژوهش از روش حالت-وینترز برای تحلیل سری‌های زمانی حاصل از زمان‌های سفر در بازه‌های زمانی گذشته استفاده شده است. در این روش با داشتن  $v_{out}$  و  $n_0$  برای بازه‌های زمانی گذشته، مقدار این متغیرها برای بازه زمانی  $t$  محاسبه می‌شود. انتخاب روش حالت-وینترز به چند دلیل بوده است: (۱) قابلیت مدل‌سازی سری‌های زمانی فصلی را دارد. (۲) به دلیل وزن دهی نمایی، داده‌های اخیر تاثیر بسیار بیشتری در پیش‌بینی دارند. (۳) برای پیش‌بینی‌های کوتاه مدت نتایج بسیار مناسبی دارد. (۴) پیاده‌سازی آن ساده است [۱۴]. ویژگی دوم در پدیده‌های ترافیکی بسیار با ارزش است. در پژوهش حاضر، کمیت‌های زمان سفر به صورت سری‌های فصلی تحلیل شده‌اند. هر روز معادل یک فصل در سری در نظر گرفته شده است. کمیت‌های زمان سفر در بازه‌هایی که فاقد تعداد کافی مشاهده بوده‌اند، از طریق درون‌یابی خطی محاسبه شده‌اند [۱۳]. برای جزئیات بیشتر در رابطه با تحلیل حالت-وینترز به کتاب کندال در این زمینه مراجعه شود [۱۴].

## ۷-۲- نحوه محاسبه آنی و پیش‌بینی زمان سفر کمان برای اتوبوس

برای محاسبه آنی زمان سفر، از مشاهدات دریافت شده از کاوشگر در بازه زمانی فعلی استفاده می‌شود. دستگاه معادلات مشاهدات در بازه زمانی  $\Delta t^{t,dp}$  که نشان دهنده بازه زمانی فعلی است، به صورت رابطه (۱۵) است:

پیش از هر چیز، فرضی‌هایی مشابه با فرض‌های بخش ۵ مطرح می‌شود.

**فرض (۵):** سرعت حرکت خودروها در کمان  $l$  و بازه زمانی  $t$ ، در طول بازه زمانی ثابت است و با  $v_c^{l,t}$  نمایش داده می‌شود.

**فرض (۶):** خودروهایی که در بازه زمانی  $t$  در کمان  $l$  حرکت می‌کنند، یا در صف چراغ راهنمایی قرار دارند و یا با سرعت  $v_c^{l,t}$  حرکت می‌کنند.

**فرض (۷):** متوسط تأخیر چراغ راهنمایی برای اتوبوس‌ها و خودروها یکسان است.

تحقیقات پیشین ثابت کرده است که نسبت به سرعت اتوبوس واقعی، ارتباط بهتری بین سرعت اتوبوس فرضی ( $v_{out}$ ) و سرعت خودروها وجود دارد. با در نظر گرفتن مفروضات اخیر، با استفاده از سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس، سرعت خودرو محاسبه می‌شود. مزیت استفاده از سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس آن است که تأثیرات تأخیر ایستگاه اتوبوس و همین‌طور تأثیر چراغ راهنمایی از آن حذف شده است. در واقع با حذف اثر خطاهای تصادفی از سرعت حرکت اتوبوس، امکان برقراری رابطه بین زمان سفر اتوبوس و زمان سفر کمان افزایش یافته است. علاوه بر این، با حذف متغیرهایی مثل تأخیر ایستگاه اتوبوس، به تعداد مشاهده کمتری برای تعیین رابطه زمان سفر خودرو و زمان سفر اتوبوس نیاز است. در پژوهش حاضر، «سرعت خودرو در کمان» ( $v_c^{l,t}$ )، بر حسب سرعت خارج از ایستگاه به دست می‌آید. با مشاهده اولیه نمودار  $v_c^{l,t}$  بر حسب  $v_{out}^{l,t}$ ، به نظر می‌رسد که رابطه‌ای درجه دوم بین این دو متغیر برقرار باشد. با این فرض، رابطه زیر تشکیل می‌شود.

$$v_c^{l,t} = av_{out}^{l,t} + b(v_{out}^{l,t})^2 + c \quad (17)$$

$a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای معادله هستند. با مشاهداتی که طی یک روز از سرعت خودروها برداشت می‌شود،  $v_c^{l,t}$  در دسترس خواهد بود.

رابطه (۱۷) را برای همه بازه‌های زمانی و مشاهدات موجود به صورت همزمان تشکیل داده و با برآورد کمترین مربعات، مقادیر  $a$ ،  $b$  و  $c$  تخمین زده می‌شود. این تخمین‌ها برابر  $\hat{a}$ ،  $\hat{b}$  و  $\hat{c}$  است و برای برآورد سرعت خودرو در کمان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{cases} f^1(v_{out}^{l,\Delta t,dp}, n_0^{l,\Delta t,dp}, q_m^{l,\Delta t,dp}, s_m^{l,\Delta t,dp}) = \varepsilon_1 \\ f^2(v_{out}^{l,\Delta t,dp}, n_0^{l,\Delta t,dp}, q_m^{l,\Delta t,dp}, s_m^{l,\Delta t,dp}) = \varepsilon_2 \\ \vdots \\ f^m(v_{out}^{l,\Delta t,dp}, n_0^{l,\Delta t,dp}, q_m^{l,\Delta t,dp}, s_m^{l,\Delta t,dp}) = \varepsilon_m \end{cases} \quad (15)$$

بعد از تشکیل معادلات مشاهدات، نوبت به تحلیل معادلات می‌رسد. هدف نهایی از تحلیل معادلات، تخمین  $n_0$  و  $v_{out}$  در یک بازه زمانی بر حسب مشاهداتی است که کاوشگر در آن بازه زمانی انجام داده است. در صورتی که در یک بازه زمانی مشاهدات کافی از کاوشگر دریافت شده باشد، امکان حل معادلات وجود دارد. برای برآورد متغیرهای مجهول از برآورد کننده کمترین مربعات استفاده شده است:

$$\min \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2 \quad (16)$$

گام بعدی، حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱۶) است. آنجا که دستگاه معادلات رابطه (۱۶) در حالت کلی از معادلاتی پیچیده و ناپیوسته تشکیل شده است، برای حل این مسئله از روش جست‌وجوی شبکه<sup>۱</sup> استفاده شده است. جست و جوی شبکه روشی ساده و با این‌حال بسیار کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی است. در هنگام محدود بودن تعداد متغیرها، این روش گزینه بسیار مناسبی است. برای جزئیات بیشتر در رابطه با این روش به [۱۵] مراجعه شود. با محاسبه آنی کمیت‌های زمان سفر برای بازه زمانی فعلی ( $\Delta t^{t,dp}$ )، امکان پیش‌بینی زمان سفر برای بازه‌های زمانی بعدی ( $\Delta t^{t+k,dp}$ ،  $k \geq 1$ ) به وجود می‌آید.

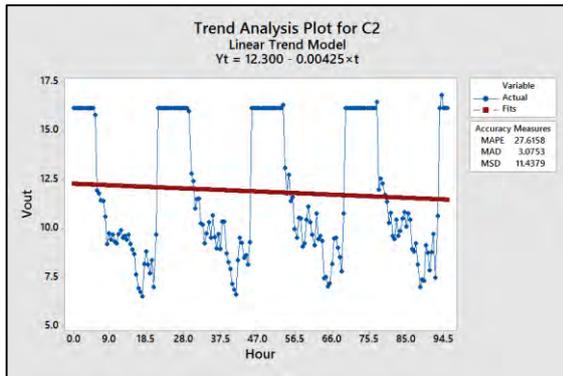
## ۸- تعیین زمان سفر خودرو

تا اینجا نحوه محاسبه تأخیر چراغ راهنمایی، پارامترهای تقاطع و سرعت خارج از ایستگاه اتوبوس مشخص شده است. هدف نهایی این پژوهش، تعیین سرعت حرکت خودروها در هر کمان و توزیع تأخیر چراغ راهنمایی برای خودروها است. طبق مفروضات اولیه این تحقیق، خودروهای عادی و اتوبوس‌ها تأخیر یکسانی را در صف چراغ راهنمایی تجربه می‌کنند. در این بخش روشی برای تعیین سرعت خودروها در هر کمان معرفی می‌شود.

<sup>۱</sup> Grid search, mesh search



(۰/۰۰۴) و تعداد پایین روزها، تفسیر مشخصی برای این روند ارائه نمی‌شود.



شکل ۷- سری زمانی  $v_{out}$  به همراه شاخص‌های دقت برازش تحلیل حالت-وینترز

بعد از تحلیل سری‌های زمانی، از پیش‌بینی این سری‌ها به همراه اطلاعات دریافتی در آخرین بازه زمانی-همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شده است- برای محاسبه آنی زمان سفر استفاده شده است. جدول ۱ تعدادی از پیش‌بینی‌های سری زمانی  $v_{out}$  را نشان می‌دهد. شاخص‌های دقت برازش (MAPE و MAD) به همراه مقدار پیش‌بینی و کران بالا و پایین پیش‌بینی در سطح اطمینان ۹۵ درصد در این جدول ذکر شده است.

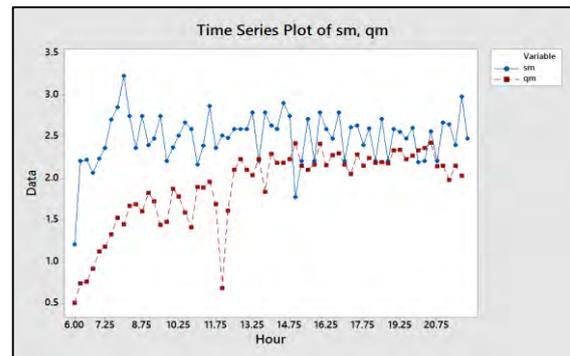
جدول (۱-۴) پیش‌بینی سری زمانی  $v_{out}$  برای کمان دوم برای تعدادی از بازه‌های زمانی

MAD	MAPE	کران بالا	کران پایین	مقدار پیش‌بینی	بازه زمانی
۰/۳۵۰	۳/۲۳۶	۱۰/۶	۸/۸۸	۹/۷۴	۹ تا ۹:۱۵
۰/۳۵۶	۳/۳۰۳	۱۱/۴۱	۹/۶۶	۱۰/۵۳	۱۱ تا ۱۱:۱۵
۰/۳۶۰	۳/۳۳۰	۱۱/۱۳	۹/۳۶	۱۰/۲۴	۱۳ تا ۱۳:۱۵
۰/۳۶۰	۳/۳۳۳	۱۰/۳۸	۸/۶۱	۹/۴۹	۱۵ تا ۱۵:۱۵
۰/۳۵۶	۳/۲۸۰	۸/۳۹	۶/۶۵	۷/۵۲	۱۷ تا ۱۷:۱۵
۰/۳۶۳	۳/۳۶۴	۱۰/۱۵	۸/۳۷	۹/۲۶	۱۹ تا ۱۹:۱۵

برای محاسبه پارامترهای رابطه (۱۷) از قسمتی از (۷۰ درصد) داده‌های به دست آمده از آمارگیری (در روز ۱۹ آذر) به منظور استخراج سرعت خودروهای عادی و همچنین از مقدار محاسبه شده  $v_{out}$  توسط مدل در روز آزمایش استفاده شده است.

برای زمان سفر هر کمان دست یافت. برای آماربرداری از سه خودروی آزمایش استفاده شده است. این خودروها مسیر مورد نظر را همراه با جریان عادی ترافیک طی کرده و دوباره به ابتدای مسیر بازگشته و مجدداً مسیر را طی کرده‌اند.

برای اثبات کارایی روش پیشنهادی پژوهش، این روش با دو روش پرستفاده در زمینه محاسبه زمان سفر کمان مقایسه شده است. روش اول به روش «خط مبنا» مشهور است [۸] و روش دوم توسط هلینگا ارائه شده است [۴]. زمان سفر اتوبوس در کمان‌های مورد مطالعه در بازه‌های زمانی پیشین، با استفاده از داده‌های اتوبوس و زمان‌بندی چراغ‌ها در فاصله ۱۵ آذر تا ۱۸ آذر محاسبه شده است. برای این منظور کمیت‌های زمان سفر و حجم ترافیک کمان در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای محاسبه شده است. شکل (۶) مقدار  $q_m$  و  $s_m$  محاسبه شده برای بازه‌های زمانی مشابه را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۶) به نظر می‌رسد که  $q_m$  تغییرات بیشتری نسبت به  $s_m$  در طول ساعات روز دارد.



شکل ۶-  $s_m$  و  $q_m$  برای بازه‌های زمانی مشابه

علاوه بر این با توجه به شکل (۶)، استفاده از بازه‌های زمانی کوتاه به جای بازه‌های زمانی بلندتر (در حدود چند ساعت) مناسب‌تر است. دلیل این مسئله تغییرات این متغیرها (به خصوص  $q_m$ ) در طول زمان است.

برای محاسبه آنی زمان سفر سری‌های زمانی زمان سفر ( $v_{out}$  و  $n_0$ ) تشکیل شده و با استفاده از روش حالت-وینترز تحلیل شده اند. شکل (۷) وضعیت سری زمانی  $v_{out}$  را برای روزهای ۱۵ تا ۱۸ آذر نشان می‌دهد. روند تغییرات روزانه  $v_{out}$  نیز در نمودار شکل (۷) قابل ملاحظه است. با این حال به دلیل کوچک بودن شیب خط

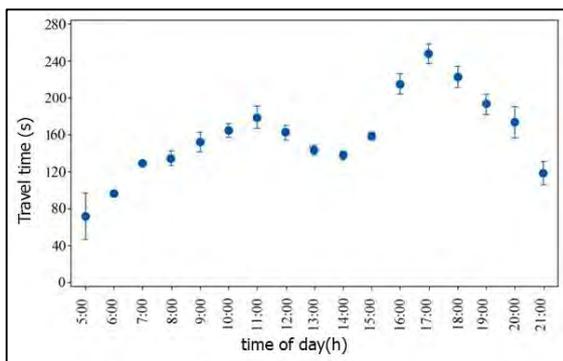
معیار RMSE استفاده شده است. RMSE روش پیشنهادی به طور میانگین نسبت روش هلینگا ۲۲ درصد و نسبت به روش خط مبنا ۳۰ درصد کاهش داشته است. جدول (۲) شامل RMSE برآورد آبی زمان سفر با استفاده از روش‌های مختلف در تعدادی از بازه‌های زمانی است (انتخاب بازه‌های زمانی به صورت تصادفی بوده است).

جدول ۲- مقایسه دقت برآورد آبی زمان سفر در روش‌های مختلف

بازه زمانی	RMSE روش پیشنهادی	RMSE روش هلینگا	RMSE روش خط مبنا
۹:۰۰ تا ۹:۱۵	۱۵/۵	۱۷/۶	۳۴/۳
۱۰:۳۰ تا ۱۰:۴۵	۱۸/۸	۲۳/۲	۳۲/۰
۱۶:۰۰ تا ۱۶:۱۵	۲۲/۹	۲۸/۰	۲۷/۲
۱۸:۰۰ تا ۱۸:۱۵	۲۰/۶	۲۸/۴	۳۲/۶
۱۹:۱۵ تا ۱۹:۳۰	۲۰/۹	۳۱/۰	۲۹/۶
۱۹:۴۵ تا ۲۰:۰۰	۱۶/۲	۲۵/۷	۳۷/۶

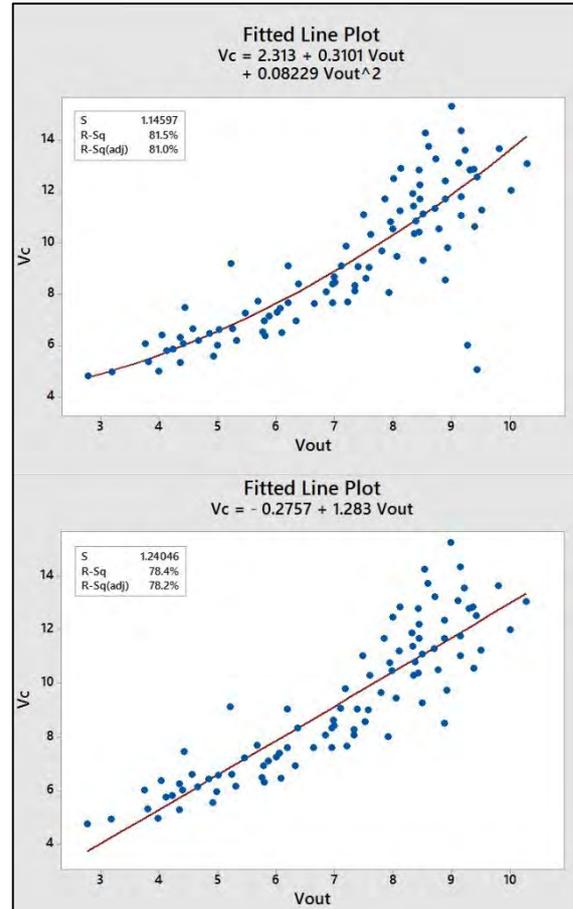
این نتایج کارایی روش پیشنهادی پژوهش نسبت به روش‌های پیشین را به وضوح نمایش می‌دهد. دقت برآورد زمان سفر در جدول (۲) برای روش‌های مختلف محاسبه شده است و نتایج نشان می‌دهد که دقت نتایج حاصل از روش پیشنهادی در همه بازه‌های زمانی از روش‌های پیشین بالاتر است.

علاوه بر ۱۹ آذر، زمان سفر خودرو برای بازه‌های زمانی تاریخی (۱۵ تا ۱۸ آذر) نیز محاسبه شده است. شکل (۹) تغییرات زمان سفر در طول روز را برای کمان دوم (به عنوان نمونه ای از یکی از سه کمان مورد مطالعه) نشان می‌دهد.



شکل ۹- زمان سفر کمان دوم در طول هفته

برای تهیه این نمودار از زمان سفر محاسبه شده برای ۱۵ تا ۱۹ آذر استفاده شده است. دایره های آبی نمایانگر میانگین زمان سفر است و بازه مشخص شده در اطراف دایره، مشخص کننده بازه اطمینان ۹۰ درصد برای زمان



شکل ۸- برازش منحنی های درجه ۱ و درجه ۲ برای تخمین رابطه سرعت اتوبوس و خودرو

رابطه (۱۷) یک رابطه درجه دوم است. شکل (۸) نحوه برازش و دقت برازش منحنی درجه ۲ را نشان می‌دهد. علاوه بر این نشان دادن بهبود دقت برآورد نسبت به برازش خطی، برازش خطی نیز در این شکل نمایش داده شده است. همانطور که از شاخص‌های ارائه شده در شکل مشخص است، دقت برازش در حالت استفاده از رابطه درجه دوم مناسب‌تر است. داده‌های چک (۳۰ درصد باقی مانده داده های آماربرداری) نیز در حالت استفاده از منحنی درجه دوم به طور میانگین بهبودی ۸ درصدی در برازش دارند که نشان از برتری برازش درجه دوم نسبت به برازش خطی برای این مسئله است.

بعد از محاسبه پارامترهای مختلف مدل، زمان سفر خودرو به صورت آبی برای روز ۱۹ آذر (روز آمارگیری یا آزمایش) محاسبه شده است. از داده‌های اخذ شده در ۷۰ درصد بازه‌های زمانی برای برآورد پارامترهای رابطه (۱۷) استفاده شده و از داده‌های بقیه بازه‌ها برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی استفاده شده است. برای برآورد دقت از

سفر است. این نمودار تغییرات زمان سفر در طول روز را به خوبی نمایش می‌دهد.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف محاسبه زمان سفر کمان‌های شبکه حمل‌ونقل شهری به منظور بهبود عملکرد سامانه‌های استفاده‌کننده از زمان سفر صورت گرفته است. در این پژوهش روشی جدید برای محاسبه زمان سفر کمان‌ها در شبکه شریانی حمل‌ونقل شهری معرفی شد. در این روش با استفاده از داده‌های موقعیت‌یاب‌های اتوبوس‌های شهری و استفاده از اطلاعات زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی، زمان سفر کمان‌ها محاسبه شد. در محاسبه آنی زمان سفر، از مقادیر زمان سفر در گذشته و داده‌های آنی زمان سفر استفاده شد. در واقع روش پیشنهادی، نحوه تلفیق داده‌های تاریخی و داده‌های جدید را معرفی می‌کند. با بهبود ۲۲ درصدی در میانگین RMSE، نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از اطلاعات زمان‌بندی چراغ راهنمایی دقت برآورد آنی زمان سفر را بهبود می‌بخشد.

روش پیشنهادی این پژوهش در موقعیتی کاربرد دارد که اطلاعات زمان‌بندی چراغ در دسترس باشد و تعداد کمی کاوشگر نیز در شبکه حمل‌ونقل در حال تردد باشند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در روش‌های کنونی مورد استفاده در تخمین زمان سفر و یا تخمین تأخیر چراغ راهنمایی، از تعداد زیادی کاوشگر استفاده می‌شود. برای مثال بسیاری از روش‌های تخمین تخمین زمان سفر

با این فرض که ۵ تا ۱۰ درصد خودروهای در حال تردد از نوع خودروهای کاوشگر باشند، اقدام به محاسبه زمان سفر می‌کنند. حال آن‌که معمولاً تعداد خودروهای کاوشگر بسیار پایین‌تر از این تعداد است. مسئله دیگری که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته، استفاده از کاوشگر اتوبوس است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد حرکت اتوبوس‌ها، استفاده از داده‌های این خودروها با دشواری‌هایی همراه بوده است. در این پژوهش تأخیر ایستگاه‌های اتوبوس مدل‌سازی شد و تأخیر ناشی از تغییر سرعت اتوبوس در هنگام ورود به ایستگاه و خروج از آن در مدل‌سازی مد نظر قرار گرفت. به نظر می‌رسد استفاده از این راهکار در بهبود دقت برآورد زمان سفر موثر بوده است. به طور کلی نتایج این پژوهش، استفاده از اتوبوس‌های شهری به عنوان کاوشگر زمان سفر را مناسب ارزیابی می‌کند. به نظر می‌رسد که با استفاده از روش پیشنهادی این پژوهش، راه برای محاسبه دقیق‌تر زمان سفر کمان‌های شبکه حمل‌ونقل شهری تهران هموارتر شده است. زمان سفرهای محاسبه شده می‌تواند در سامانه‌های ناوبری شهری مورد استفاده قرار گرفته و به بهبود سفرهای شهری کمک کند.

اگرچه این پژوهش روشی کامل برای محاسبه آنی زمان سفر پیشنهاد داده است، همچنان مسائلی برای کار بیشتر باقی مانده است. برای مثال ارائه روابط عمومی‌تر برای استخراج زمان سفر خودرو از طریق زمان سفر اتوبوس در تحقیقات آتی ضروری به نظر می‌رسد.

## مراجع

- [1] S. Bessler, and T. Paulin. (2013). "Literature study on the state of the art of probe data systems in Europe."
- [2] M. Singleton, and J.E. Ward, "A comparative study of various types of vehicle detectors", Virginia, USA, Springfield, 1977.
- [3] E. Jenelius, and H. N. Koutsopoulos, "Travel time estimation for urban road networks using low frequency probe vehicle data.", *Transportation Research Part B: Methodological*, 53, 64-81, 2013.
- [4] B. Hellenga, P. Izadpanah, H. Takada, and L. Fu, "Decomposing travel times measured by probe-based traffic monitoring systems to individual road segments." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(6), 768-782, 2008.
- [5] R.L. Bertini, and S. Tantiyanugulchai, "Transit buses as traffic probes: Use of geolocation data for empirical evaluation." *Transportation Research Record*, 1870(1), 35-45, 2004.
- [6] N. Uno, F. Kurauchi, H. Tamura, and Y. Iida, "Using Bus Probe Data for Analysis of Travel Time Variability.", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 2-15, 2009.

- [7] H. Van Zuylem, F. Zheng, and Y. Chen, "Using Probe Vehicle Data for Traffic State Estimation in Signalized Urban Networks." Traffic Data Collection and its Standardization, New York, Springer, 2010.
- [8] A. Hofleitner, R. Herring, and A. Bayen, "Arterial travel time forecast with streaming data: A hybrid approach of flow modeling and machine learning", 46(9), 1097-1122, 2012.
- [9] A. Hofleitner, R. Herring, P. Abbeel, and A. Bayen, "Learning the Dynamics of Arterial Traffic From Probe Data Using a Dynamic Bayesian Network.", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13(4), 1679-1693, 2012.
- [10] J. Shen, and W. Li, "Cluster analysis of larger-scale discrete data with application to estimating dwell time of bus route." Pakistan Journal of Statistics, 29(5), 873-886, 2013.
- [11] R. Bellman, "Dynamic programming and Lagrange multipliers.", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 42(10), 767, 1956.
- [12] R. Foroozandeh, F. Hakimpour, and N. Khademi, "Link travel time estimation based on probe vehicle data", 21<sup>st</sup> National Geomatics Conference, Tehran, 2014.
- [13] E. Keogh, S. Chu, D. Hart, and M. Pazzani, "An online algorithm for segmenting time series", ICDM Proceedings IEEE International Conference on, 2001.
- [14] M.G. Kendall, and J.K. Ord, Time-series, London, Edward Arnold, 1990.
- [15] T.G. Kolda, R.M. Lewis, and V. Torczon, "Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods.", SIAM review, 45(3), 385-482, 2003.