

# تخمین زمان سفر در شبکه‌های شهری با استفاده از داده‌های با بسامد کم حاصل از سامانه موقعیت‌یاب جهانی

مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا گنج‌خانلو، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

افشین شریعت مهیمنی\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مجتبی رجبی بهاء‌آبادی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shariat@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

صفحه ۱۳۲-۱۱۱

## چکیده

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی، از داده‌های مکانی حاصل از سامانه موقعیت‌یاب جهانی می‌توان برای تخمین زمان سفر در اجزای مختلف شبکه راه‌های شهری استفاده کرد. در عمل، داده‌های مکانی حاصل از سامانه موقعیت‌یاب جهانی، اغلب با بسامد کم و بطور متوسط هر یک یا دو دقیقه ثبت می‌شوند. هدف این مقاله، ارائه ابزاری مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی است تا با بکارگیری آن بتوان از داده‌های با بسامد کم سامانه موقعیت‌یاب جهانی به منظور تخمین زمان سفر استفاده کرد. برای ارزیابی دقت ابزار پیشنهادی، از داده‌های مکانی با بسامد کم مربوط به سه مسیر در شهر تهران استفاده شد. این داده‌ها با استفاده از تلفن‌های همراه جمع‌آوری شده‌اند. در راستای تخمین زمان سفر پیوندهای هر مسیر، ابتدا داده‌های با فاصله زمانی ۱۲۰ ثانیه به شبکه دیجیتالی تطبیق داده می‌شوند. سپس، مسیر پیموده شده در بین این نقاط شناسایی می‌شود. در ادامه، متوسط زمان سفر پیوندها در طول بازه‌های ۲۰ دقیقه‌ای تخمین زده می‌شود و با زمان سفرهای واقعی پیوندها مقایسه می‌گردد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش ارائه شده، قابلیت بالایی در شناسایی صحیح مسیرها دارد. بطوری که، به طور متوسط بیش از ۹۱/۰۶ درصد پیوندها به درستی شناسایی می‌شوند. مقایسه زمان سفرهای تخمین زده شده با مقادیر واقعی، نشان می‌دهد که زمان سفر، ۹۰ درصد پیوندها، با خطای کمتر از ۲۰ درصد برآورد شده است. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج برخی مطالعات پیشین دقت بالای تخمین‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: استنتاج مسیر، تخمین زمان سفر، تطبیق به نقشه، سامانه اطلاعات جغرافیایی، سامانه موقعیت‌یاب جهانی

## ۱- مقدمه

مؤلفه‌های هزینه از دیدگاه مسافر در نظر گرفته شده است (Khademi et al., 2016; Wang et al., 2021). ارزش زمان سفر برای مسافر سبب شده است که این شاخص به یکی از مهمترین شاخص‌های ارزیابی شبکه‌های حمل و نقلی بدل گردد (de Jong et al., 2020). بر این اساس، شاخص زمان سفر همواره در مقایسه پروژه‌ها و طرح‌های حمل و نقلی مورد

اطلاع از زمان سفر برای برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت شبکه حمل‌ونقل و همچنین طراحی و ارزیابی عملکرد انواع سیستم‌های حمل و نقلی دارای اهمیت بسیار زیادی است (Correa et al., 2024). زمان سفر عنصری تاثیرگذار بر انتخاب‌های مرتبط با سفر مسافران به شمار می‌آید؛ به طوریکه در بسیاری از مدل‌های حمل و نقلی، به عنوان یکی از مهمترین

هزینه اولیه پایین تری برای پیاده‌سازی نیاز دارد (Chen et al., 2000).

میزان استفاده از GPS در سطح کاربران شبکه معابر در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است. علاوه بر اتوبوس‌های حمل‌ونقل همگانی و برخی تاکسی‌ها، اکثریت افراد دارای تلفن‌های همراه هوشمند هستند که اکثر مطلق آنها دارای سامانه موقعیت‌یاب GPS می‌باشند. نرخ نفوذ تلفن‌های همراه در جمعیت جهان در اواخر سال ۲۰۰۷ بیش از ۵۰ درصد بوده است (۳۰ تا ۴۰ درصد در کشورهای در حال توسعه و ۹۰ تا ۱۰۰ درصد در کشورهای توسعه‌یافته) (Herrera et al., 2010). ترکیب تلفن‌های مجهز به GPS با سامانه اطلاعات جغرافیایی<sup>۵</sup> (GIS)، فرصت مناسبی را برای جمع‌آوری داده‌های ترافیکی مفید و نسبتاً ارزان بوجود می‌آورد (Byon et al., 2006). تلفن‌های مجهز به GPS روش مقرون‌به‌صرفه برای نظارت بر ترافیک بوده و دقت بالایی در سنجش موقعیت و سرعت وسایل نقلیه دارند و زیرساخت شبکه ارتباطی آنها فراهم است (Herrera et al., 2010). از این رو، در حال حاضر امکان دسترسی به این اطلاعات بسیار فراهم‌تر است. بنابراین ضرورت دارد برای استفاده از این فرصت، مطالعات کافی صورت گیرد.

عمده پژوهش‌هایی که در گذشته در مورد تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های GPS انجام شده‌اند؛ برای داده‌های با بسامد بالا<sup>۶</sup> بوده‌اند. بدین معنا که فاصله زمانی بین هر دو نقطه متوالی ثبت شده، بسیار کوتاه (معمولاً کمتر از دو ثانیه) است. در این قبیل از داده‌ها، مسیر واقعی را که توسط وسیله نقلیه پیموده شده است؛ به سهولت از طریق توالی نقاط قابل استنتاج است. اما در عمل چنانچه بتوان زمان سفر مسیر را با استفاده از داده‌های با بسامد کم<sup>۷</sup> (معمولاً با فاصله زمانی بیشتر از ۳۰ ثانیه برای هر دو نقطه متوالی) تخمین زد؛ در اینصورت این امکان فراهم خواهد شد که از مشکلات و محدودیت‌های مربوط به جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌های حجیم مربوط به بازه‌های زمانی کوتاه‌تر اجتناب کرد و همچنین هزینه‌های تخمین زمان سفر را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. تخمین زمان سفر با داده‌های با بسامد کم در مقایسه با داده‌های با بسامد بالا دارای دو چالش اصلی در رابطه با تخمین زمان سفر است. نخست، اینکه به علت فاصله‌ای که از نظر زمانی و مکانی بین نقاط مختلف اتفاق می‌افتد و همچنین به علت تراکم زیاد

توجه بوده است. از دیگر نمونه‌های عملی کاربرد داده‌های زمان سفر می‌توان به پرداخت مدل‌های تخصیص ترافیک و شبیه‌سازی، مدیریت به‌لحظه<sup>۱</sup> شبکه حمل‌ونقل، مدیریت سوانح، مدل‌های پیش‌بینی زمان سفر، تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر و مواردی از این قبیل اشاره کرد. بنابراین باید تلاش شود تا در یک شبکه حمل و نقلی زمان سفر مسیرها بصورت دقیق برآورد شود.

داده‌های زمان سفر معمولاً با استفاده از حس‌گرهای نصب شده در یک نقطه<sup>۲</sup> مانند شناس‌گرهای حلقه‌ای<sup>۳</sup> و دوربین‌های نصب شده در سطح شهر جمع‌آوری می‌شوند. هزینه نصب و نگهداری این حس‌گرها زیاد است و پوشش کل شبکه راه‌های یک شهر با حس‌گرهای نقطه‌ای غیر عملی است (Ghandeharioun et al., 2022; Rahmani, 2015). نصب و تعمیر و نگهداری دوربین‌ها و شناس‌گرهای حلقه‌ای باعث ایجاد اختلال در جریان ترافیک شده و از این رو منجر به افزایش تأخیر و تصادفات در مسیرها می‌شوند (Chen et al., 2000). برای شرایط تراکم سنگین یا برای خیابان‌های شریانی، استفاده از شناس‌گرهای حلقه‌ای برای تخمین زمان سفر، توصیه نمی‌شود (Turner et al., 1998). یکی دیگر از روش‌های جمع‌آوری داده‌های زمان سفر استفاده از برچسب‌های الکترونیکی در سیستم‌هایی مانند فناوری جمع‌آوری الکترونیکی عوارض است. این روش نیز به معایبی از قبیل هزینه نصب زیرساخت‌ها، محدودیت پوشش شبکه و امکان جمع‌آوری داده‌ها فقط در مسیرهای بین آنتن‌ها محدود است (Herrera et al., 2010). به‌طور کلی این روش‌ها به امکانات و تجهیزات زیادی نیاز دارند. از این رو، بسیاری از شهرها به دنبال منابع مکمل یا جایگزین برای جمع‌آوری داده‌های ترافیکی می‌باشند. یکی از منابعی که امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است؛ فناوری سامانه موقعیت‌یاب جهانی<sup>۴</sup> (GPS) است. برخلاف شناس‌گرهای نصب شده در ایستگاه‌های خاص (مانند بلوتوث، دوربین‌های فیلم‌برداری، شناس‌گرهای حلقه‌ای)، با استفاده از این فناوری می‌توان داده‌های سرعت و زمان سفر وسایل نقلیه را در هر بخش از شبکه که وسایل نقلیه مجهز به GPS در حال حرکت در آن هستند، بدون نیاز به اندازه‌گیری جریان ترافیک، جمع‌آوری کرد (Antoniou et al., 2011; Jenelius et al., 2013). همچنین فناوری GPS در مقایسه با فناوری‌هایی از قبیل دوربین‌ها و شناس‌گرهای حلقه‌ای به

در «محیط GIS» پرداخته‌اند. هرچند که این دو مقاله از GIS به عنوان محیطی برای ایجاد الگوریتم خود استفاده کرده‌اند ولی آنها نیز فرایندهای تطبیق به نقشه «به‌لحظه» را برای تطبیق نقاط GPS از قبل جمع‌آوری شده به شبکه دیجیتالی استفاده کرده‌اند.

دالومپینز (Dalumpines, 2014) اولین روش برای تطبیق نقاط GPS از قبل جمع‌آوری شده به نقشه را که به طور کامل از توابع GIS استفاده کند و همچنین از روش‌های تطبیق به نقشه به‌لحظه استفاده نکند را ارائه داد. وی با توجه به نتایج مطلوبی که در تطبیق نقاط به نقشه به‌خصوص در محل تقاطعات حاصل می‌شود؛ بیان می‌کند که محیط GIS برای ایجاد الگوریتم تطبیق به نقشه برای داده‌های تاریخیچه‌زمانی بسیار ایده‌آل است. روش دالومپینز اولاً برای داده‌های با بسامد بالا (ثابت سه نقطه GPS در هر دو ثانیه) بود. بنابراین داده‌ها پشت سرهم بوده و از این رو چالش استنتاج مسیر از داده‌های دارای فاصله زیاد از هم، در مطالعه وی عملاً وجود نداشت. ثانیاً روش وی تنها به مرحله تطبیق نقاط به نقشه پرداخت که این مرحله یکی از مراحل تخمین زمان سفر است. به عبارت دیگر ایشان در مطالعه خود روشی را برای تخمین زمان سفر ارائه نکرد. بنابراین مطالعه‌ای که به طور کامل در محیط GIS به تطبیق نقاط و استنتاج مسیر از داده‌های GPS «با بسامد کم» (مانند ثبت هر نقطه از هر ۱۲۰ ثانیه) بپردازد و سپس زمان سفر را از طریق این نقاط تطبیق یافته برآورد نماید؛ در ادبیات موضوع مشاهده نشد. از این رو مطالعه حاضر می‌کوشد تا با ارائه ابزاری مبتنی بر GIS برای تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های با بسامد کم، این خلأ مطالعات پیشین را برطرف نماید. بر همین اساس، این مطالعه قابلیت به‌کارگیری الگوریتم کوتاهترین مسیر نرم‌افزار GIS در شناسایی پیوندهای پیموده شده توسط خودروها را که در مطالعات قبل برای داده‌های با بسامد بالا استفاده شده بود، برای داده‌های با بسامد کم نشان می‌دهد و همچنین اولین روش تخمین زمان سفر در محیط GIS را معرفی می‌کند. مسئله مورد نظر در این تحقیق، نحوه تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های تاریخیچه‌زمانی، به خصوص داده‌های با بسامد کم سامانه موقعیت‌یاب جهانی است. در این راستا، این مطالعه با به‌کارگیری داده‌های GPS تلفن‌های همراه در طول سه مسیر واقع در شبکه معابر درون‌شهری، به ایجاد و اجرای ابزاری برای تخمین زمان سفر

پیوندهای شبکه، مسیر پیموده شده توسط خودروها معمولاً نامشخص است. از این رو در مورد داده‌های با بسامد کم ممکن است بیش از یک مسیر وجود داشته باشد به طوری که توالی نقاط مختلف را بتواند پوشش دهد. دوم، اینکه حتی در صورت مشخص بودن مسیر بین دو نقطه متوالی، زمان سفر پیوندهای مختلف مسیر مورد نظر مشخص نبوده و نیاز است که زمان مشاهده‌شده بین هر دو نقطه متوالی به پیوندهای بین آن نقاط تخصیص یابد. معمولاً در مطالعات تخمین زمان سفر با داده‌های با بسامد کم در قالب دو مرحله به مشکل فوق پرداخته شده است: ۱- «تطبیق به نقشه»<sup>۸</sup> و «استنتاج مسیر»<sup>۹</sup> و ۲- تخمین زمان سفر. در مرحله اول نقاط GPS ثبت‌شده، به مسیرهای شبکه دیجیتالی معابر تطبیق یافته و محتمل‌ترین مسیر پیموده شده توسط وسیله‌نقلیه بین نقاط متوالی تطبیق یافته شناسایی می‌شود. در مرحله دوم، فاصله زمانی بین هر دو نقطه GPS متوالی به صورت زمان سفر پیوندهای پیموده شده در بین آن دو نقطه تخصیص یافته و سپس با هم‌فزون‌سازی زمان سفر پیوندها برای وسایل‌نقلیه مختلف در طول آن بازه، زمان سفر پیوند را می‌توان برآورد کرد. از نظر زمان جمع‌آوری داده‌ها، تخمین زمان سفر می‌تواند برای داده‌های «تاریخیچه‌زمانی»<sup>۱۰</sup> یا «به‌لحظه» GPS انجام شود. منظور از داده‌های تاریخیچه‌زمانی، داده‌های از قبل جمع‌آوری شده است. روش‌هایی که برای تطبیق نقاط تاریخیچه‌زمانی به نقشه دیجیتالی «تطبیق به نقشه پس‌پردازش»<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شوند، اطلاعاتی را به عنوان ورودی می‌گیرند که با اطلاعات ورودی روش‌های تطبیق به نقشه به‌لحظه متفاوت است. از این رو رویکردی که برای این دو نوع روش تطبیق به نقشه به کار می‌رود با یکدیگر متفاوت است (Dalumpines, 2014). عمده پژوهش‌های پیشین در زمینه تطبیق به نقشه، به تطبیق نقاط GPS «به‌لحظه» به نقشه‌های دیجیتالی پرداخته‌اند (Quddus et al., 2007). در این دسته از مطالعات، از GIS در صورت استفاده، تنها برای نمایش<sup>۱۲</sup> نتایج تطبیق به نقشه استفاده شده است (Taylor et al., 2006). فقط تعداد محدودی مطالعه در زمینه تطبیق نقاط GPS «تاریخیچه‌زمانی»، به ویژه در پژوهش‌های حوزه حمل‌ونقل، انجام شده است (Dalumpines, 2014). از میان این مطالعات محدود نیز به نقل از دالومپینز (Dalumpines, 2014) تنها دو مطالعه (Chung et al., 2005; Zhou, 2005) به تطبیق نقاط GPS از قبل جمع‌آوری شده به نقشه

می‌پردازد و بدین ترتیب دسترسی به اهداف زیر را فراهم می‌نماید. این ابزار به‌گونه‌ای ایجاد شده است که کلیه مراحل، از پیش‌پردازش داده‌ها تا تخمین زمان سفر، به صورت کاملاً خودکار در محیط Arc GIS انجام می‌شود:

- امکان‌سنجی استفاده از داده‌های GPS به منظور تخمین زمان سفر تا از هزینه‌های مربوط به نصب و نگهداری فناوری‌های دیگر (مانند دوربین‌ها و شناس‌گرهای حلقه‌ای) و جمع‌آوری داده‌های زمان سفر از طریق این فناوری‌ها کاسته شود.

- کمک به ایجاد بستری که در آن افراد غیر متخصص نیز بتوانند با استفاده از داده‌های GPS که از شبکه خود در اختیار دارند زمان سفر را برای کارهای تحقیقاتی یا عملی خود تخمین بزنند.

- کمک به ایجاد بستری برای تخمین زمان سفر به طوری که با استفاده از آن، بر خلاف روش‌هایی مانند سنسورهای بلوتوث، امکان تخمین زمان سفر در گستره‌ای از مسیرهای شبکه که در آن‌ها تجهیزات خاصی برای جمع‌آوری داده‌های زمان سفر نصب نشده است؛ فراهم شود.

در ادامه در این مقاله، ابتدا در بخش دوم، پیشینه پژوهش به‌صورت خلاصه مرور می‌شود. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش ارائه می‌شود. بخش چهارم به تشریح منطقه مورد مطالعه و روش جمع‌آوری داده‌های زمان سفر می‌پردازد. در بخش پنجم، نتایج «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» و «تخمین زمان سفر» ارائه خواهند شد. در نهایت در بخش ششم، علاوه بر جمع‌بندی، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

مطالعات انجام شده در زمینه تخمین زمان سفر با داده‌های GPS را می‌توان در دو دسته مطالعات مربوط به «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» (مرحله اول) و مطالعات مربوط به «تخمین زمان سفر» (مرحله دوم) به طور خلاصه تبیین کرد. مطالعات تطبیق به نقشه را نیز می‌توان با توجه به فاصله زمانی بین داده‌ها در دو طبقه مطالعات مربوط به داده‌های با بسامد بالا و مطالعات مربوط به داده‌های با بسامد کم دسته‌بندی نمود. از آنجا که تمرکز این مطالعه بر داده‌های با بسامد کم است، بنابراین سعی می‌شود این دسته از مطالعات با جزئیات بیشتری بیان شود. مطالعات مختلفی در زمینه تطبیق به نقشه با استفاده از داده‌های با بسامد بالا انجام شده‌اند. برنشتاین و کرناووز

(Bernstein et al., 1998) روش‌های تطبیق به نقشه را به دو دسته «هندسی» و «توپولوژیکی»<sup>۱۳</sup> تقسیم کرد. قدوس (۲۰۰۶) (Quddus, 2006) دسته سوم را با عنوان «روش‌های پیشرفته» به این گروه اضافه کرد. هاشمی و کریمی (Hashemi et al., 2014) با جای دادن دو دسته هندسی و توپولوژیکی در یک دسته با عنوان «روش‌های ساده»، الگوریتم‌های تطبیق به نقشه را در سه طبقه دسته‌بندی کرد که عبارتند از: «الگوریتم‌های تطبیق - به - نقشه ساده»، «الگوریتم‌های تطبیق - به - نقشه پیشرفته» و «الگوریتم‌های تطبیق - به - نقشه مبتنی بر وزن».

روش هندسی از اطلاعات هندسی شبکه دیجیتالی و فقط با در نظر گرفتن شکل پیوندها برای تطبیق نقاط استفاده می‌کند (Greenfeld, 2002). نحوه اتصال پیوندها به یکدیگر در این روش در نظر گرفته نمی‌شود. مطالعات وایت و همکاران (White et al., 2000)، بوجو و همکاران (Bouju et al., 2002)، سرینیواسان و همکاران (Srinivasan et al., 2003) در این زمینه می‌باشند. الگوریتم تطبیق به نقشه‌ای که در کنار خصوصیات هندسی مسیرها، پیوستگی پیوندها را نیز در نظر می‌گیرد؛ الگوریتم تطبیق به نقشه توپولوژیکی نامیده می‌شود (Chen et al., 2003; Greenfeld, 2002; Meng et al., 2002). منگ و همکاران (Meng et al., 2002)، لی و فو (Jie et al., 2003) به تطبیق نقاط GPS با بسامد بالا با استفاده از این روش پرداختند.

منظور از الگوریتم‌های پیشرفته آن دسته از الگوریتم‌ها است که از مفاهیم و روش‌های پالایش مانند پالایش کالمن، توری دمپستر- شفر<sup>۱۴</sup>، منطق فازی یا استنتاج بیزین استفاده می‌کنند. مطالعات یانگ و همکاران (Yang et al., 2003)، نجار و بنیفایات (El Najjar et al., 2005)، الگوریتم منطق فازی قدوس (Quddus, 2006) از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌باشند. الگوریتم‌های مبتنی بر وزن با تعریف برخی معیارها (مانند نزدیکی پیوند به نقطه GPS) و نمره‌دهی برای هر پیوند براساس معیارهای تعریف شده، در نهایت پیوندی را که دارای بیشترین نمره است در صورت برآورده شدن برخی ملاحظات برای تخصیص نقطه GPS انتخاب می‌کند. قدوس و همکاران (Quddus et al., 2003)، ولگا و همکاران (Velaga et al., 2009)، لی و همکاران (Li et al., 2013)، هاشمی و کریمی (Hashemi et al., 2016)

همکاران (She et al., 2012) یک روش نمره‌دهی برای انجام تطبیق به نقشه به لحظه معرفی کردند. این روش مؤلفه‌های فاصله تا پیوند، سویه، و دسترسی توپولوژیکی را در نظر می‌گیرد. رحمانی و کوتسوپولوس (Rahmani & Koutsopoulos, 2013) روشی برای انجام همزمان تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر برای داده‌های با بسامد کم خودروها ارائه کرده‌اند. آنها برای شناسایی مسیر الگوریتم کوتاهترین مسیر  $A^*$ ، که روشی بر مبنای الگوریتم دایگسترا است، به کار می‌برند. برای سنجش عملکرد مدل، روش پیشنهاد شده با استفاده از داده‌های واقعی شهر استکهلم، سوئد، اجرا شده و با برخی از روش‌های موجود مقایسه می‌شود. نتایج مطالعه حاکی از عملکرد مناسب این روش است. لیو و همکاران (Liu et al., 2017) روش جدیدی برای تطبیق نقاط با بسامد کم و وسایل نقلیه ارائه کردند. عوامل زمانی<sup>۱۸</sup> و فضایی که در مدل مذکور در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از: دقت مکانی نقاط GPS مشاهده شده، قابلیت دسترسی زمانی و فضایی، توزیع فضایی نقاط میانی بین نقاط GPS متوالی و سازگاری جهت رانندگی با توجه به نقاط GPS. با استفاده از دو پایگاه داده واقعی از داده‌های خودروهای پکن و شانگهای، عملکرد روش پیشنهادی از نظر تطبیق نقاط به نقشه با عملکرد سه روش تطبیق نقطه به خط، روش تطبیق فضایی - مکانی (لو و همکاران (Lou et al., 2009)) و روش مبتنی بر وزن‌دهی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر موارد روش پیشنهاد شده دارای دقت بالاتری در تطبیق نقاط به نقشه در بازه‌های زمانی مختلف ۵ تا ۱۲۰ ثانیه است. برای فاصله نمونه‌گیری ۶۰ ثانیه که در سیستم‌های خودرو کاوش‌گر رایج است؛ دقت روش پیشنهادی در تطبیق نقاط حدود ۸۷ درصد است که حدود ۱۰ درصد نسبت به روش تطبیق فضایی - مکانی و ۵ درصد نسبت به روش مبتنی بر وزن‌دهی بالاتر است.

بعد از انجام «تطبیق به نقشه» و «استنتاج مسیر»، مرحله بعدی تخمین زمان سفر پیوندها و مسیر می‌باشد. در راستای این کار، لی و مک‌دونالد (Li et al., 2002) با استفاده از داده‌های یک خودرو کاوش‌گر روشی را برای تخمین زمان سفر بر اساس تحلیل پروفیل سرعت - زمان ارائه داده‌اند. در این مطالعه با توجه به ویژگی‌های پروفیل سرعت، الگوهای رانندگی با یک خودرو کاوش‌گر با استفاده از مجموعه‌های فازی

الگوریتم‌های مبتنی بر وزن‌دهی را برای تطبیق نقاط GPS با بسامد بالا ارائه کرده‌اند.

سه دسته کلی روش‌های تطبیق نقاط GPS که درباره آنها صحبت شد؛ بر مبنای داده‌های با بسامد بالا بود. دسته جدیدی از روش‌های تطبیق به نقشه در سال‌های اخیر معرفی شده است که برای داده‌های با بسامد پایین نیز کاربرد دارد. این روش‌ها عمدتاً به این علت بوجود آمده‌اند که داده‌های GPS که از بسیاری از وسایل نقلیه در شهرها جمع‌آوری می‌شود؛ با توالی پایین است. منبع این‌گونه داده‌ها معمولاً سیستم‌های مدیریت ناوگان است که داده‌های موقعیت و وسایل نقلیه آنها به‌طور متوسط در هر یک یا دو دقیقه ثبت می‌شود. داده‌هایی که جمع‌آوری می‌شوند؛ به علت محدودیت در انتقال داده‌ها معمولاً شامل اطلاعاتی از قبیل سویه<sup>۱۹</sup> و سرعت لحظه‌ای وسایل نقلیه و فاصله پیموده شده توسط وسایل نقلیه نیستند و تنها طول و عرض جغرافیای نقاط و زمان ثبت داده‌ها را شامل می‌شوند.

در این راستا، براکتسولاس و همکاران (Brakatsoulas et al., 2005) شناسایی مسیر از داده‌های با بسامد کم را برای خودروهای با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه دو روش مختلف «روش افزایشی»<sup>۱۶</sup> و «روش عمومی» ارائه شد. لو و همکاران (Lou et al., 2009) یک الگوریتم تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر دو مرحله‌ای، با عنوان روش تطبیق - ST، برای داده‌های ۲ الی ۵ دقیقه‌ای ارائه داده است. مرحله اول این روش، تعدادی از نقاط GPS متوالی را در نظر گرفته و مجموعه پیوندهای کاندید هر یک از این نقاط را پیدا می‌کند. در مرحله دوم، در راستای یافتن مسیر صحیح، محاسبات به‌گونه‌ای انجام می‌شود که معیارهای زمانی و فاصله‌ای به‌طور کلی بیشینه شود. در مطالعه دیگری، ژنگ و قُدوس (Zheng et al., 2011) با استفاده از یک سیستم نمره‌دهی مبتنی بر مجموع وزن‌دار چهار عامل مختلف، ملاحظات مکانی<sup>۱۷</sup> (فاصله و جهت) مربوط به شناسایی مسیر صحیح را ارائه می‌کنند. این روش مسیری را از میان مسیرهای کاندید به عنوان مسیر صحیح برمی‌گزیند که دارای بیشترین امتیاز باشد. هانتز و همکاران (Hunter et al., 2013) روشی احتمالاتی برای تطبیق موقعیت و وسایل نقلیه به پیوندها با استفاده از مدل بیزین پیشنهاد دادند. این رویکرد بر اساس مؤلفه‌های تصادفی محتمل‌ترین مسیری را که از مشاهدات قابل استنتاج است؛ انتخاب می‌کند. در مطالعه دیگری، شی و

را برای تخمین زمان سفر پیوندها پیشنهاد دادند. رحمانی و همکاران (Rahmani et al., 2015) از داده‌های GPS با بسامد کم (۲ دقیقه) برای تخمین توزیع زمان سفر مسیرها با یک روش غیر پارامتری استفاده کرد. تمرکز این مطالعه بر تعیین و تصحیح خطاهای داده‌های خودروهای کاوش‌گر در اثر پوشش ناکافی مسیر و عبور از مسیرهای مجاور هم بود. داده‌های ۱۵۰۰ تاکسی به‌کار رفت و نتایج آن با داده‌های زمان سفر دوربین‌های پلاک‌خوان خودکار<sup>۲۰</sup> (ANPR) مقایسه شد. نتایج بیانگر این بود که روش پیشنهادی قابلیت محاسبه میانگین، میانه و درصدهای توزیع زمان سفر را دارد. در مطالعه‌ای، ساناولاه و همکاران (Sanullah et al., 2016) به دنبال تخمین دقیق‌تر زمان سفر با به‌کارگیری داده‌های حس‌گرهای در حال حرکت از قبیل تاکسی‌ها و وسایل نقلیه لجستیک مجهز به GPS برای زمان نزدیک به لحظه<sup>۲۱</sup> می‌باشند. آنها پس از تطبیق نقاط به نقشه، دو روش ریاضی برای تخمین زمان سفر پیوندها با استفاده از اطلاعات مربوط به پیوستگی شبکه و سرعت خودروها ارائه می‌دهند. این روش پیشنهادی، تاثیر توالی داده‌ها، نرخ نفوذ وسایل نقلیه و طول پنجره زمانی را در دقت تخمین زمان سفر بررسی می‌کند. رحمانی و همکاران (Rahmani et al., 2017) رویکرد نقطه ثابت را برای تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های با بسامد کم وسایل نقلیه به‌کار می‌برند. آنها روش جدیدی برای پیش‌پردازش داده‌ها (تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر) و تخمین زمان سفر ارائه نمی‌دهند. در واقع آنها در هر مرحله از تکرار رویکرد نقطه ثابت از روش‌های پیشین برای انجام این دو مرحله استفاده می‌کنند. اما فرمول‌بندی رویکرد نقطه ثابت را به گونه‌ای انجام می‌دهند که ضمن پرداختن به این دو مسأله به صورت همزمان، با تعداد تکرارهای کمتر به جواب‌های دقیق‌تر برسند.

### ۳- روش شناسی پژوهش

#### ۳-۱- تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر

برای تطبیق نقاط GPS به نقشه، عمده مطالعات پیشین علاوه بر «طول جغرافیایی»، «عرض جغرافیایی» و «تاریخ و زمان»، از حداقل یکی از اطلاعات «سرعت لحظه‌ای نقاط GPS»، «ارتفاع نقاط» و «سویه حرکت نقاط GPS» استفاده کرده‌اند. در این مطالعه برای تطبیق نقاط GPS با بسامد کم به

طبقه‌بندی شده است. آلتمن هال و دو (Aultman-Hall et al., 2006) با امکان‌سنجی استفاده از داده‌های GPS با بسامد کم برای تخمین زمان سفر مسیرهای محلی، روشی را برای تخمین زمان سفر پیوندهای شبکه ارائه می‌کنند. تمرکز اصلی این مطالعه بر تخمین زمان سفر ۴ مسیر محلی که ۳۶/۵ درصد پیوندهای آنها را نقاط GPS پوشش داده‌اند می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که زمان سفرهای بدست آمده از روش پیشنهاد شده مشابه زمان سفر بدست آمده از داده‌های با بسامد بالا می‌باشد (میزان اختلاف زمان سفر تخمین زده شده برای پیوندها و زمان سفر مشاهداتی ۱۹/۲ درصد می‌باشد). هشینگ و همکاران (Hesheng et al., 2007) با توجه به حجم نمونه‌های داده‌های GPS تاکسی‌ها، روش‌های مختلفی برای تخمین زمان سفر مسیرها ارائه می‌دهند. در این مطالعه بازه اطمینان زمان سفرهای تخمین زده شده محاسبه می‌شود. برای ارزیابی عملکرد روش ارائه شده، زمان سفرهای تخمین زده شده با داده‌های GPS تاکسی‌ها با زمان سفر بدست آمده از طریق شناس‌گرهای حلقه‌ای مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که خطای زمان سفرهای تخمین زده شده با داده‌های GPS کمتر است. هلینگا و همکاران (Hellinga et al., 2008) روشی برای حل مسأله تخصیص زمان سفر به تک تک پیوندها پیشنهاد دادند. این روش با استفاده از داده‌های یک شبکه شبیه‌سازی شده و از طریق مقایسه با روش معیار مورد ارزیابی قرار گرفت. ژنگ و ون زولین (Zheng et al., 2010) با استفاده از داده‌های خودروهای کاوش‌گر به مقایسه مدل‌های تخمین زمان سفر پیوندهای معابر درون‌شهری پرداخت. مدل پیشنهادی ایشان برای شبکه شبیه‌سازی شده در VISSIM ارزیابی شد. هر شبیه‌سازی در ۶۵ دقیقه و با استفاده از داده‌های با توالی ۶۰ ثانیه اجرا شد. نتایج نشان داد که عملکرد مدل آنها بهتر از مدل هلینگا است. ایزدپناه و همکاران (Izadpanah et al., 2011) به تخمین زمان سفر به‌لحظه مسیرهای عبوری وسایل نقلیه با استفاده از داده‌های ۱ ثانیه‌ای ۸ خودرو کاوش‌گر و اطلاعات موج شوک<sup>۱۹</sup> پرداختند. در این مطالعه، زمان سفر پیوندها در حالت استفاده از داده‌های خودروهای کاوش‌گر در مقایسه با حالت استفاده از داده‌های شناس‌گرها با دقت بالاتری تخمین زده شد. در این پژوهش، عملکرد روش پیشنهادی برای داده‌های با بسامد کم مورد سنجش قرار نگرفت. ژنگ و ون زولین (Zheng et al., 2013) مدل شبکه عصبی مصنوعی

«تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» در داخل محیط ArcGIS استفاده شده است. البته اطلاعات قابل استفاده برای تطبیق نقاط به نقشه با استفاده از داده‌های GPS که سیستم‌های مدیریت حمل و نقل شهرها از ناوگان خود (مانند اتوبوس‌ها) جمع‌آوری می‌کنند؛ معمولاً شامل همین سه مورد می‌باشد. بنابراین این موضوع می‌تواند قابلیت کاربرد عملی این روش را نیز نشان دهد.

### ۳-۲- تخمین زمان سفر

یک مسیر به صورت مجموعه‌ای از پیوندها از یک مبدا به یک مقصد تعریف می‌شود. زمان سفر یک مسیر را به دو روش می‌توان تخمین زد: ۱- از طریق همفزون‌سازی<sup>۲۴</sup> زمان سفر تک تک پیوندها (پیوند - مبنا) ۲- به صورت مستقیم خود مسیر در نظر گرفته شود (مسیر - مبنا). روش پیوند - مبنا متوسط زمان سفر مسیر و روش مسیر - مبنا توزیع زمان سفر را بدست می‌دهد (Rahmani, Jenelius, et al., 2013). از آنجا که هدف این مطالعه تخمین زمان سفر مسیر است لذا روش پیوند - مبنا برای تخمین زمان سفر مسیر بکار گرفته شده است. جدول (۱) نمادهای مورد استفاده در این روش را نشان می‌دهد.

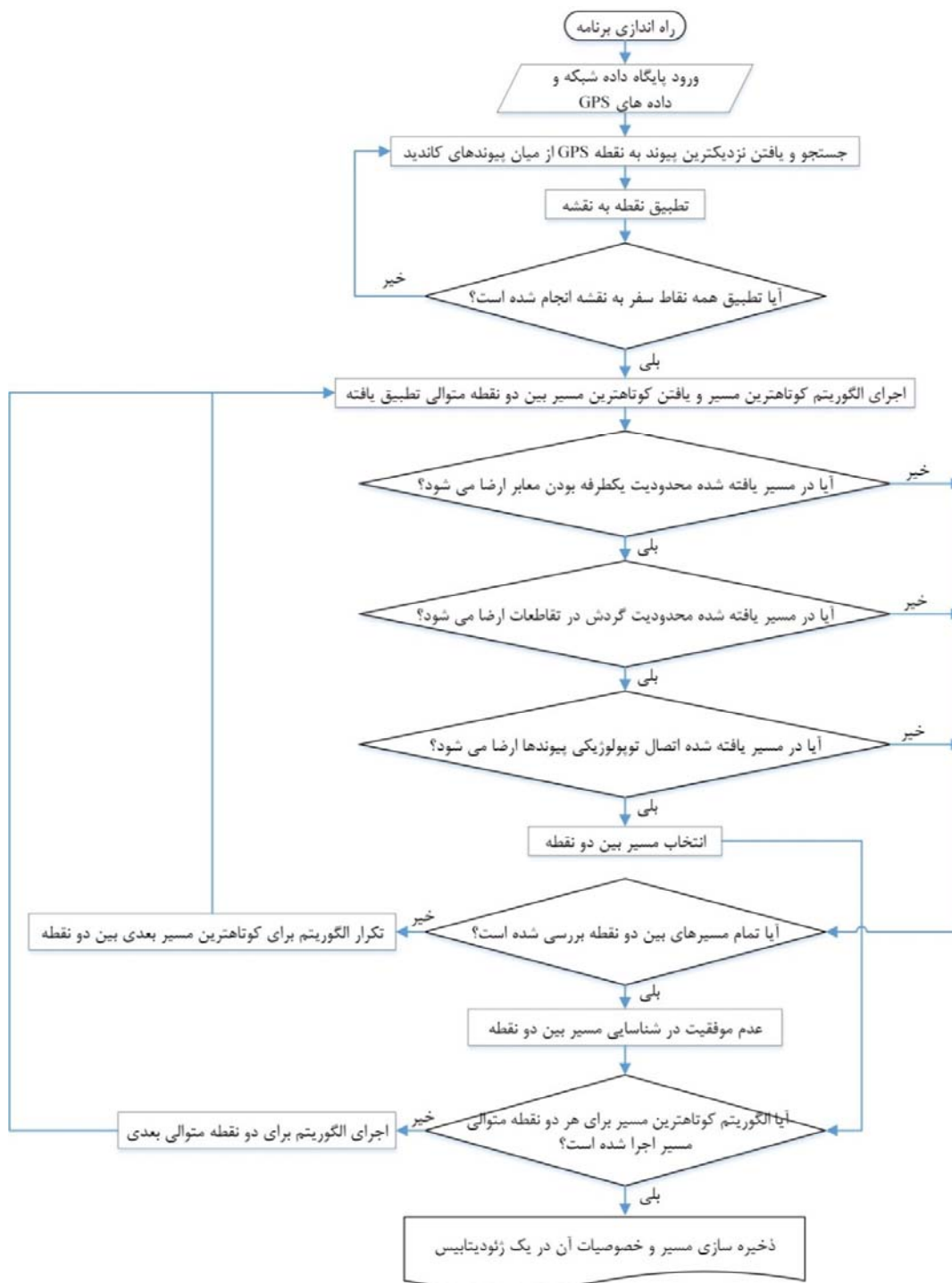
جدول ۱. نمادهای مورد استفاده در روش تخمین زمان سفر

$\varphi_i$	$i$ - امین زمان سفر مشاهداتی
$\mu_{ik}$	جزئی از پیوند $k$ که توسط مشاهده $i$ - ام پوشش یافته
$\alpha_k$	جزئی از پیوند $k$ که مشمول مسیر تعریف شده است.
$l_k$	طول پیوند $k$

شکل (۲) نمادهای فوق را در قالب یک مثال توضیح می‌دهد. در این مثال  $\mu$  و  $\alpha$  عبارتند از:  $\mu_1 = d1/L1$ ،  $\mu_2 = d2/L2$ ،  $\mu_3 = d3/L3$ ،  $\mu_4 = d4/L4$ ،  $\mu_5 = 0$ ،  $\alpha_1 = 0$ ،  $\alpha_2 = h1/L2$ ،  $\alpha_3 = h2/L3$ ،  $\alpha_4 = h3/L4$ ،  $\alpha_5 = h4/L5$ .

مدل شبکه پیشرفته و الگوریتم کوتاهترین مسیر موجود در نرم‌افزار ArcGIS، امکان استفاده کارا از اطلاعات توپولوژیکی شبکه را فراهم نموده و به این ترتیب این نرم‌افزار را قادر می‌سازد تا الگوریتم‌هایی که در محیط آن برای تطبیق نقاط و شناسایی مسیر ایجاد می‌شوند؛ نتایج دقیقی بدست دهند (Dalumpines, 2014). در حالی که سایر الگوریتم‌های تطبیق به نقشه که از «مدل شبکه مسطح»<sup>۲۲</sup> به جای ArcGIS استفاده می‌کنند؛ در تطبیق نقاط GPS به نقشه در محل تقاطعات دارای مشکل می‌باشند (Quddus et al., 2007). دالومپینز (Dalumpines, 2014) نرم‌افزار ArcGIS را محیط ایده‌آل برای ایجاد الگوریتم‌های تطبیق به نقشه، جهت تطبیق داده‌های GPS تاریخیچه زمانی به نقشه‌های دیجیتالی معرفی می‌کند. از این رو در این مطالعه برای انجام مرحله تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر نرم‌افزار ArcGIS مورد استفاده قرار گرفت.

هسته روش بکار گرفته شده برای استنتاج مسیر در این پژوهش، استفاده از «ابزار تحلیل مسیر»<sup>۲۳</sup> (بسط تحلیل گر شبکه) است. این ابزار با استفاده از یک الگوریتم کوتاهترین مسیر و ایستگاه‌های تعریف شده، اقدام به یافتن کوتاهترین مسیر می‌نماید. الگوریتم کوتاهترین مسیر موجود در ArcGIS از ضوابط توپولوژیکی و خصوصیات مسیر (مانند یک طرفگی معابر و محدودیت گردش در تقاطعات) استفاده کرده و به این ترتیب کوتاهترین یا بهترین مسیر را بین نقاط ایجاد می‌کند (Dalumpines, 2014). از پایتون برای انجام خودکار مراحل



شکل ۱. نمودار مراحل گام «تطبيق به نقشه و استنتاج مسیر»

در برخی مطالعات مهم مشابه مقایسه می‌شوند. روش پیشنهادی دارای دو مرحله است: تخصیص زمان سفرهای مشاهده شده به پیوندها و تخمین زمان سفر هر پیوند.

در این مطالعه، برای ایجاد ابزار تخمین زمان سفر از روش پیوند - مبنا ارائه شده در (Rahmani, Jenelius, et al., 2013) استفاده شده و نتایج بدست آمده با نتایج گزارش شده

### ۳-۲-۱- تخصیص زمان سفر

در این مرحله، زمان سفر مشاهده شده  $\varphi_i$  به نسبت طول پیموده شده بر روی هر پیوند به طول پیوندهای واقع در مشاهده مورد نظر تخصیص می‌یابد. به عبارتی شیواتر:

$$\varphi_{ik} = \left( \frac{\mu_{ik} l_k}{\sum_k \mu_{ik} l_k} \right) \varphi_i \quad (1)$$

متغیرهای رابطه فوق قبلاً تعریف شده‌اند.

### ۳-۲-۲- همفزون‌سازی

برای مشاهداتی که با کل طول یک پیوند هم‌پوشانی ندارند؛ زمان سفر تخصیص یافته  $\varphi_{ik}$  در مقیاس کل طول پیوند محاسبه می‌شود:

$$tt_{ik} = \frac{1}{\mu_{ik}} \varphi_{ik} \quad (2)$$

که در آن  $tt_{ik}$  زمان سفر تخمین زده شده برای پیوند  $k$  در اثر مشاهده  $i$  - ام است. متغیرهای دیگر پیش‌تر تعریف شده‌اند.

در رابطه (۲) مقیاس‌بندی با این فرض انجام می‌شود که سرعت در طول پیوند یکنواخت است.

در ادامه برای زمان سفر بدست آمده از طریق هر مشاهده، وزنی با توجه به مقدار طول پیموده شده از پیوند در طی آن مشاهده اختصاص می‌یابد. بنابراین متوسط زمان سفر پیوند از میانگین وزن‌دار همه مشاهدات واقع در بازه زمانی مورد نظر محاسبه می‌شود:

$$tt_k = \frac{\sum_i \mu_{ik} tt_{ik}}{\sum_i \mu_{ik}} \quad (3)$$

که در آن  $tt_k$  متوسط زمان سفر تخمین زده شده برای پیوند  $k$  در اثر همه مشاهدات واقع در بازه زمانی مورد نظر است. سایر متغیرها پیش‌تر تعریف شده‌اند.

### ۳-۲-۳- محاسبه میانگین زمان سفر

برای تخمین میانگین زمان سفر مسیر، متوسط زمان سفر پیوندهای مسیر مورد نظر مطابق با رابطه (۴) جمع می‌شوند. در این رابطه متناسب با طولی از پیوند که در مسیر مورد نظر واقع می‌شود، زمان سفر آن پیوند در نظر گرفته می‌شود.

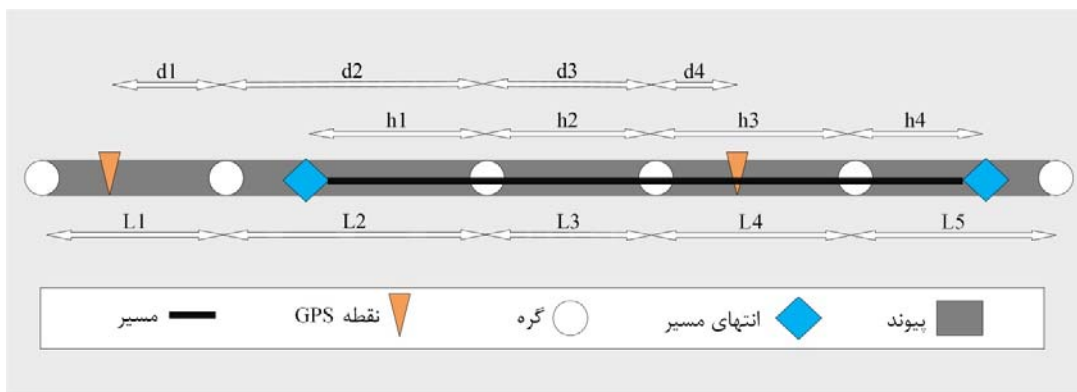
$$\overline{TT} = \sum_k \alpha_k \overline{tt_k} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $\overline{TT}$  میانگین زمان سفر مسیر را در بازه زمانی مورد نظر نشان می‌دهد.

مراحل کلی این روش به صورت فلوچارت شکل (۳) نشان داده شده است. در واقع این نمودار گردش، ادامه نمودار گردش گام «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» (شکل ۱) می‌باشد.

### ۴- منطقه مورد مطالعه و روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های GPS مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از تلفن‌های همراه رانندگان تاکسی‌های خطی سه مسیر درون‌شهری میدان رسالت - میدان ولیعصر، میدان رسالت - میدان هروی و میدان رسالت - پایانه پاسداران به صورت میدانی جمع‌آوری شدند. این داده‌ها با فاصله زمانی یک‌ثانیه‌ای و در دوره اوج صبح برداشت شدند. برای جمع‌آوری داده‌ها برنامه‌ای بر روی تلفن‌های همراه دارای سامانه موقعیت‌یاب GPS با سیستم عامل اندروید نصب شد. با شروع حرکت وسیله نقلیه در مبدا، این برنامه فعال شده و تلفن همراه در داخل وسیله نقلیه قرار می‌گرفت. در مقصد نیز به محض رسیدن وسیله نقلیه، تلفن همراه دریافت شده و برنامه غیر فعال می‌شد. هر تلفن همراهی که در مقصد دریافت می‌شد سعی می‌شد با اولین وسیله نقلیه‌ای که به سمت مبدا مسیر مورد مطالعه می‌خواهد حرکت کند ارسال شود. جمع‌آوری داده‌ها در مدت ۴ روز، در دوره اوج صبح روزهای یکشنبه، دوشنبه، سه شنبه و چهارشنبه برای هریک از مسیرها (در مجموع سه هفته برای هر سه مسیر) انجام شد. در هر روز از این دوره‌ها، بسته به تعداد تلفن‌های همراه قابل دسترس به طور تقریبی بین ۱۲ تا ۱۵ تلفن همراه هر روز استفاده شد.



شکل ۲. مثالی از نمادهای مورد استفاده در تخمین زمان سفر

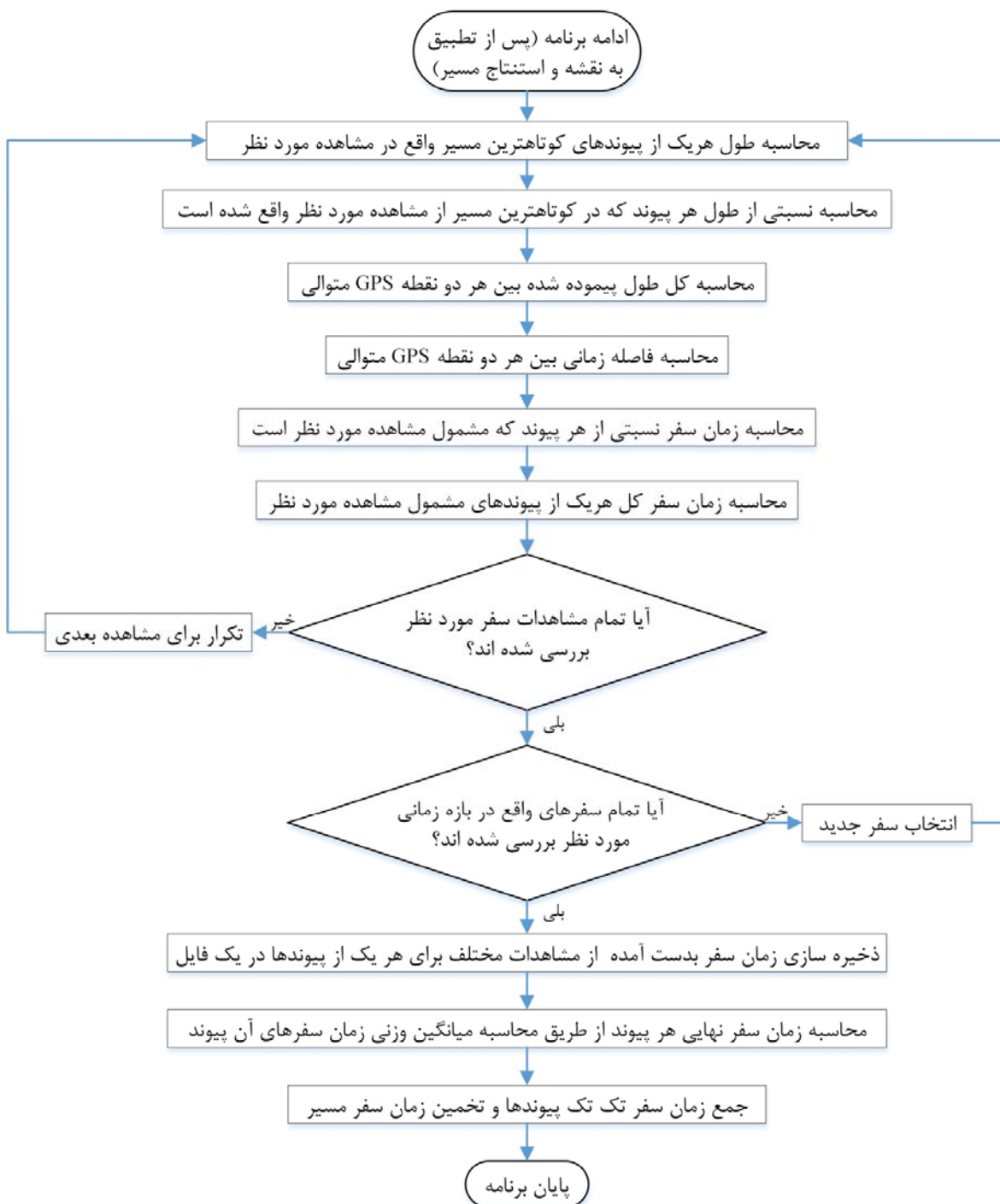
موارد نوع مسیر کاملاً متفاوت بود. ولی با این حال، در بیشتر موارد سفرهای مختلف پیوندهای مشترک زیادی داشتند. شکل (۴) مسیرهای مورد مطالعه را با در نظر گرفتن پیوندهایی که در اغلب سفرها پیموده می‌شدند نشان می‌دهد. در جدول (۲) نیز تعداد سفرهایی که در هر روز از هر مسیر داده‌های GPS آنها برداشت شده است را نشان می‌دهد.

از طرفی بسته به مدت زمانی که برای پیمایش مسیر در حالت رفت و برگشت صرف می‌شد و همچنین سرفاصله زمانی حرکت خودرها در مبدا و مقصد، هر گوسی ۱، ۲، ۳ یا ۴ بار برای جمع‌آوری داده‌های مسیر مورد نظر از مبدا تا مقصد به کار رفت.

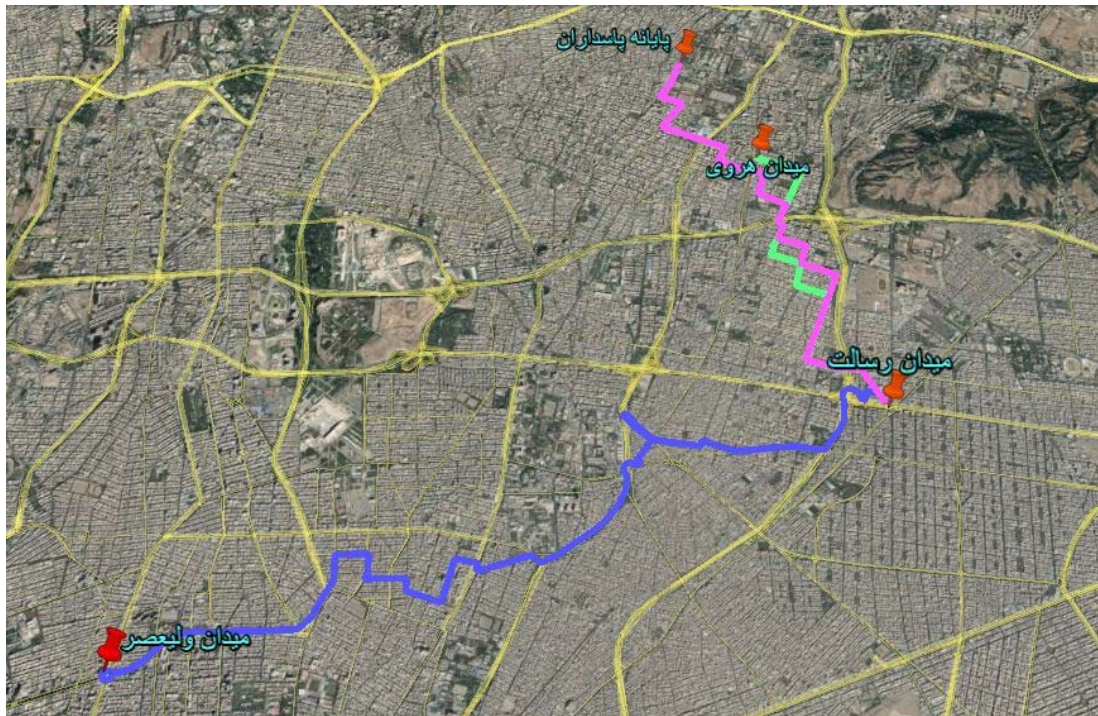
معمولاً پیوندهایی که در طول سفرهای مختلف از هر مسیر پیموده می‌شدند لزوماً یکسان نبودند به طوری که در برخی

جدول ۲. داده‌های جمع‌آوری شده

مسیر	روز	تعداد سفرهایی که داده‌های GPS آنها برداشت شده است	مجموع
میدان رسالت - میدان ولیعصر	اول	۱۰	۴۳
	دوم	۱۱	
	سوم	۱۲	
	چهارم	۱۰	
میدان رسالت - پایانه پاسداران	اول	۲۰	۶۵
	دوم	۱۵	
	سوم	۱۷	
	چهارم	۱۳	
میدان رسالت - میدان هروی	اول	۱۶	۵۹
	دوم	۱۸	
	سوم	۱۲	
	چهارم	۱۳	
مجموع			۱۶۷



شکل ۳. نمودار مراحل گام تخمین زمان سفر



شکل ۴. سه مسیر مورد مطالعه

## نتایج تحلیل داده‌ها

### تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر

داده‌های جمع‌آوری شده با فاصله زمانی یک ثانیه بودند. اما از آنجا که این مطالعه به دنبال تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های با بسامد کم GPS است. از این رو از بین داده‌های جمع‌شده، داده‌های مورد نیاز به گونه‌ای انتخاب شدند که فاصله زمانی بین هر دو داده متوالی به طور متوسط ۱۲۰ ثانیه باشد. سپس برای داده‌های مذکور، روش تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر ارائه شده در فصل سوم اجرا شد. شکل (۵) به صورت نمونه تطبیق دو نقطه با فاصله زمانی ۱۲۰ ثانیه به نقشه و تعیین مسیر بین این دو نقطه با استفاده از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد (دو نقطه اولیه با ستاره قرمز رنگ و نقاط تطبیق یافته آنها با مربع‌های سبز رنگ نمایش داده شده است). در این شکل داده‌های یک ثانیه‌ای بین این دو نقطه نیز نمایش داده شده است.

برای ارزیابی عملکرد این روش، درصد شناسایی صحیح پیوندهایی که در واقعیت وسیله نقلیه در هر سفر پیموده است بر اساس رابطه (۵) محاسبه شد.

$$T = \frac{|id \cap tr|}{|tr|} \quad (5)$$

$$F = 1 - T \quad (6)$$

که در آن:

$T$ : برابر است با نسبت پیوندهایی که در فرایند «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» در مقایسه با پیوندهایی که در واقعیت پیموده شده‌اند به درستی شناسایی شده‌اند.

$F$ : برابر است با نسبت پیوندهایی که در فرایند «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» در مقایسه با پیوندهایی که در واقعیت پیموده شده‌اند به اشتباه شناسایی شده‌اند.

$id$ : برابر است با نسبت پیوندهایی که در فرایند «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر» به عنوان پیوندهای پیموده‌شده شناسایی شده‌اند.

$tr$ : پیوندهایی که در واقعیت توسط وسیله نقلیه پیموده شده‌اند.

لازم به ذکر است که پیوندهای واقعی پیموده شده توسط وسیله نقلیه با استفاده از ردیابی داده‌های یک ثانیه‌ای سفرها تعیین شده‌اند. جدول (۳) نتایج حاصل از فرایند تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر را به صورت کلی نمایش می‌دهد. همان‌طور که

ترتیب به مقدار قابل توجهی می‌تواند تعداد پیوندهای صحیح شناسایی شده در بین دو نقطه اولیه (با فاصله زمانی ۱۲۰ ثانیه) را افزایش دهد.

از طرفی دیگر، بررسی مسیرهای شناسایی شده نشان می‌دهد که در اغلب موارد ضعف روش بکار رفته در شناسایی صحیح پیوندها مربوط به ناحیه‌هایی است که دارای معابر تقریباً شطرنجی و با پیوندهای کوتاه می‌باشند. به طوری که در بیشتر موارد، پیوندی که به اشتباه شناسایی می‌شود؛ موازی با پیوند اصلی است. وقوع این حالت تا حدودی می‌تواند میزان خطا در تعیین زمان سفر نهایی مسیر مورد نظر را کاهش دهد. زیرا می‌توان گفت که پیوندهای کوتاه موازی مجاور هم تفاوت زیادی در زمان سفر نداشته باشند.

ملاحظه می‌شود، روش بکاررفته توانست بیش از ۹۱/۰۶ درصد پیوندهای پیموده شده توسط وسایل نقلیه را به درستی شناسایی کند. با توجه به اینکه فاصله زمانی بین هر دو داده متوالی به طور متوسط ۱۲۰ ثانیه است؛ بنابراین چنین دقتی در تعیین پیوندهای صحیح دقت بسیار مطلوبی است. نتایج ارائه شده در مطالعات پیشین نیز دلیل دیگری بر صحت این ادعا است. الکسون (Axelsson, 2015) بیان می‌کند که با بکارگیری روش ارائه شده توسط رحمانی و کوتسوپولوس (Rahmani & Koutsopoulos, 2013) برای داده‌های با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه به دقتی حدود ۹۵ درصد می‌رسد. بدیهی است که اگر روش این مطالعه برای داده‌های با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه انجام شود می‌تواند به دقت بالاتری دست یابد. زیرا در این صورت بین هر دو نقطه فعلی، سه نقطه دیگر نیز واقع شده و بدین



شکل ۵. نمونه‌ای از تطبیق نقاط به نقشه و استنتاج مسیر از بین این دو نقطه

جدول ۳. درصد پیوندهای صحیح شناسایی شده در مرحله «تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر»

روش	درصد متوسط $T$	درصد متوسط $F$
تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر	۹۱/۰۶	۸/۹۴

### تخمین زمان سفر پیوندها

شده در هر یک از این بازه‌ها برای تخمین زمان سفر پیوندهای تشکیل دهنده مسیر مورد نظر در همان بازه استفاده شد.

برای تخمین زمان سفر، دوره اوج صبح به صورت بازه‌های ۲۰ دقیقه‌ای در نظر گرفته شد. سپس از داده‌های جمع‌آوری

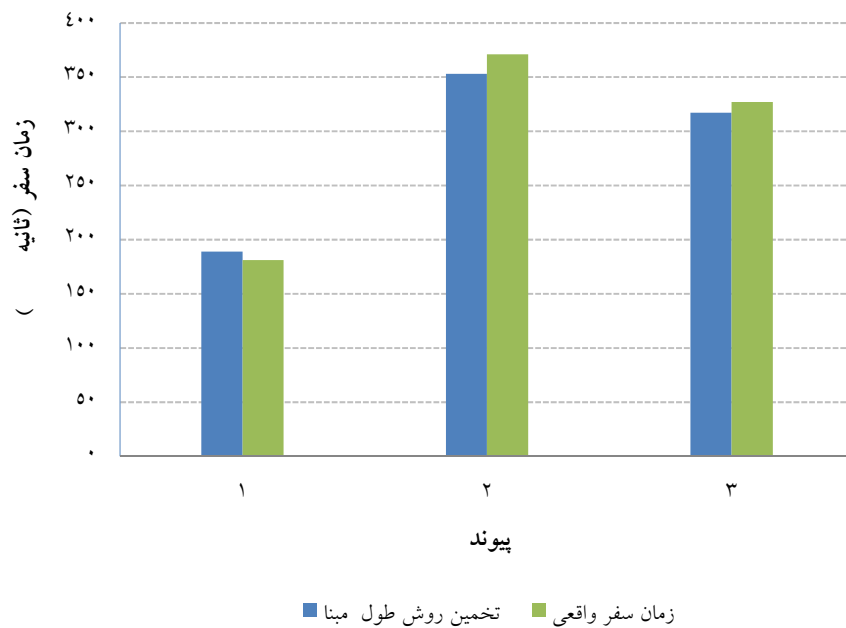
حالت روش ارائه شده اندکی کمتر از زمان سفر اندازه‌گیری شده، زمان سفر پیوند را برآورد می‌کند. در این حالت میزان خطا برابر با  $4/85$  درصد است.

در پیوند شماره ۳ نیز زمان سفر قطعه انتهایی مسیر میدان رسالت - پایانه پاسداران یعنی حدفاصل تقاطع صیاد شیرازی - خیابان موسوی تا پایانه پاسداران در بازه ۸:۰۰ تا ۸:۲۰ روز دوم تجمیع داده‌ها نشان داده شده است. در این مورد، روش این مطالعه زمان سفر پیوند را اندکی کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند و میزان خطا برابر با  $3/06$  درصد است.

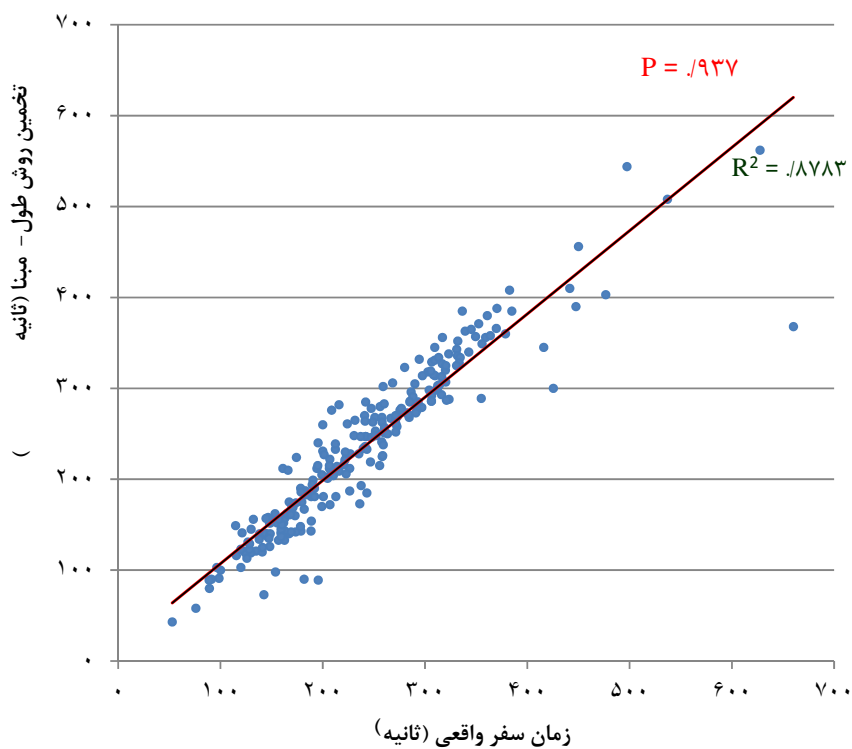
شکل (۷) میزان دقت روش این مطالعه را در تخمین زمان سفر پیوندهای همه مسیرها در همه بازه‌های زمانی نشان می‌دهد. این شکل شامل زمان سفر همه پیوندهای همه مسیرها در تمام بازه‌های زمانی روزهای جمع‌آوری داده‌ها است. برازش مناسب نقاط به خط رگرسیون حاکی از دقت مناسب روش این تحقیق در تخمین زمان سفر پیوندها است. از این رو می‌توان گفت در بیشتر موارد زمان سفر تخمین زده شده برای پیوندها به مقدار واقعی زمان سفر آن پیوند نزدیکتر است. بالاتر بودن مقدار  $R^2$  و ضریب همبستگی پیرسون (نزدیک به ۱)، بیانگر وجود رابطه خطی قوی‌تر و همبستگی بیشتر داده‌ها است و این موضوع نیز بیانگر دقت مطلوب روش این مطالعه در تخمین زمان سفر پیوندها است. ساناولاه و همکاران (Sanavallah et al., 2016) در مطالعه خود، دو روش برای تخمین زمان سفر پیوندها با استفاده از داده‌های ۳، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه ارائه می‌دهند. آنها در بررسی همبستگی مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی زمان سفر پیوندها، به  $R^2 = 0.7104$  در روش اول و  $R^2 = 0.8367$  در روش دوم دست می‌یابند. با توجه به شکل‌های (۷) ملاحظه می‌شود که مقدار  $R^2$  روش مورد استفاده این مطالعه بالاتر است. از این رو می‌توان گفت این پژوهش با دقت بالاتری می‌تواند مقادیر واقعی را تخمین بزند.

با توجه به طول مسیرها، حدفاصل تقاطعات مهم به صورت یک پیوند در نظر گرفته شد. به طوری که مسیر میدان رسالت - میدان هروی به صورت ۳ پیوند، مسیر میدان رسالت - پایانه پاسداران به صورت ۴ پیوند و مسیر میدان رسالت - میدان ولیعصر بسته به نوع مسیر به صورت ۶ یا ۷ پیوند در نظر گرفته شد. تخمین زمان سفر پیوندها با استفاده از روش پیوند - مبنا انجام شد. برای ارزیابی عملکرد روش این مطالعه در تخمین زمان سفر، زمان سفر هریک از پیوندهای مورد نظر با استفاده از داده‌های یک ثانیه‌ای جمع‌آوری شده از سفرهای انجام شده در طول آن بازه محاسبه شد. داده‌های یک ثانیه‌ای با خطای بسیار کمی در محل شروع و پایان پیوندهای مورد نظر ثبت شده‌اند. بنابراین این امکان را فراهم می‌کنند تا با دقت مطلوبی زمان سفر هر پیوند را با توجه به اختلاف زمان ابتدا و انتهای آن تعیین کرد. برای پیوندهایی که در سفرهای مختلف پیموده شده‌اند؛ با میانگین‌گیری از زمان سفر آن پیوند در سفرهای مختلف، متوسط زمان سفر آن پیوند در بازه زمانی مورد نظر در نظر گرفته شده و به عنوان معیار برای مقایسه دقت روش این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۶) به عنوان نمونه زمان سفر یک پیوند از هر مسیر را در یکی از بازه‌های ۲۰ دقیقه‌ای نشان می‌دهد.

پیوند شماره ۱، پیوند میدان ملت - میدان هروی واقع در مسیر میدان رسالت - میدان هروی می‌باشد. زمان سفر ارائه شده برای این پیوند مربوط به بازه زمانی ۷:۰۰ تا ۷:۲۰ روز اول جمع‌آوری داده‌ها است. همانطور که از شکل مشخص است روش این مطالعه زمان سفر این پیوند را کمی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کرده‌اند. دقت تخمین انجام شده مطلوب است به طوری که میزان خطا برابر  $4/41$  درصد است. پیوند شماره ۲، نشانگر حدفاصل تقاطع صیاد شیرازی - خیابان شیخ صفی و تقاطع بزرگراه امام علی (ع) - خیابان سبلان شمالی، از مسیر میدان رسالت - میدان ولیعصر می‌باشد. زمان‌های سفر گزارش شده مربوط به بازه ۸:۲۰ تا ۸:۴۰ روز سوم جمع‌آوری داده‌ها است. برخلاف پیوند شماره ۱، در این



شکل ۶. نمونه‌ای از تخمین زمان سفر پیوندها



شکل ۷. رابطه بین زمان سفر تخمین زده شده برای پیوندها با مقادیر اندازه‌گیری شده

جدول (۴) مقادیر دو نوع خطای «میانگین درصد خطای مطلق» و «خطای ریشه دوم میانگین مربعات نرمال» را برای زمان سفرهای تخمین زده شده برای پیوندها نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر این نوع خطاها در برخی مطالعات پیشین، چنین نتیجه می‌شود که روش این مطالعه دقت بالایی در تخمین زمان سفر پیوندها دارد. مقدار MAPE که سانااولاه و همکاران (Sanullah et al., 2016) برای تخمین زمان سفر پیوندها با استفاده از داده GPS با فاصله زمانی ۱۲۰ ثانیه گزارش کرده‌اند برابر ۱۱/۱۲ درصد در روش اول و ۸/۴۳ درصد در روش دوم بوده است. با توجه به مقادیر MAPE در جدول زیر، مشخص می‌شود که دقت این مطالعه از دقت روش اول آنها بالاتر بوده و از دقت روش دوم آنها اندکی پایین‌تر است.

جدول ۴. مقادیر MAPE و NRMSE در تخمین زمان سفر پیوندها

روش	%MAPE	%NRMSE
پیوند - مینا	۹/۴۰	۱۳/۸۰

شکل (۸) توزیع فراوانی مقادیر خطا در تخمین زمان سفر پیوندها با استفاده از روش این مطالعه را نشان می‌دهد. در این روش، زمان سفر ۷۰ درصد پیوندها با خطای زیر ۱۰ درصد تخمین زده شده است. برای ۲۰ درصد پیوندها میزان خطا بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بوده و تنها برای ۱۰ درصد پیوندها تخمین زمان سفر با خطای بیشتر از ۲۰ درصد انجام شده است. کمتر بودن تعداد نمونه‌های برداشت شده از هر پیوند در هر یک از بازه‌های ۲۰ دقیقه‌ای حذف داده‌های پرت را محدود کرده است. اگرچه تعداد داده‌های پرت در برآورد زمان سفر پیوندها بسیار اندک است ولی اگر تعداد نمونه‌های برداشت شده از هر پیوند بیشتر می‌بود شاید امکان حذف داده‌های پرت با روش‌هایی مانند مقایسه هر یک از زمان‌های برآورد شده برای آن پیوند با میانگین زمان سفر آن پیوند فراهم می‌شد. از این رو در این مطالعه روش پالایش منطقی برای حذف داده‌های پرت به نظر نرسید.

برای نمایش بهتر دقت روش مورد استفاده در تخمین زمان سفر پیوندها میانگین درصد خطای مطلق<sup>۲۵</sup> (MAPE) و نیز خطای ریشه دوم میانگین مربعات نرمال<sup>۲۶</sup> (NRMSE) برای زمان سفرهای تخمین زده شده و مقدار متناظر اندازه‌گیری شده برای آنها محاسبه شد. محاسبه این دو نوع خطا در ادبیات موضوع مرسوم است. میانگین درصد خطای مطلق طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta t_i - T_i}{\Delta t_i} \right| \quad (7)$$

در رابطه فوق:

$\Delta t_i$ : اختلاف زمان سفر ابتدا و انتهای پیوند  $i$ -ام (زمان سفر واقعی با استفاده از داده‌های یک‌ثانیه‌ای)

$T_i$ : زمان سفر تخمین زده شده با استفاده از روش

پیوند- مینا

$n$ : تعداد کل پیوندهای در نظر گرفته شده

خطای ریشه دوم میانگین مربعات نرمال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

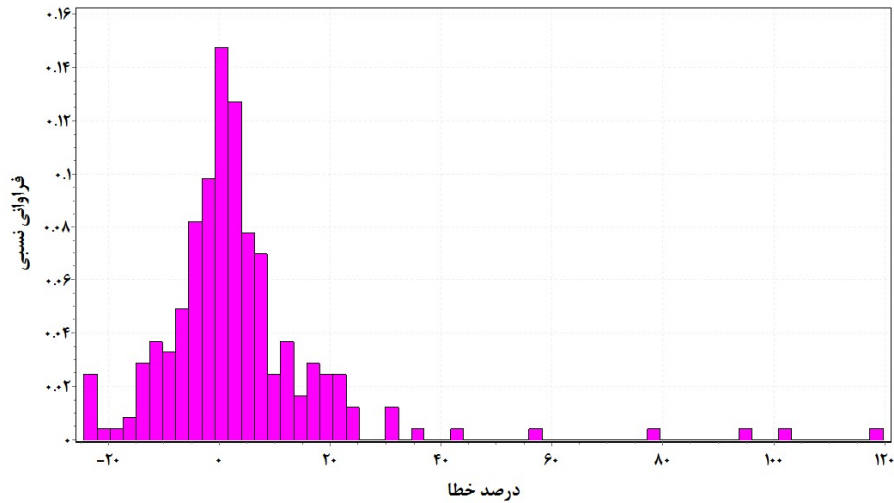
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{\Delta t}} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $\overline{\Delta t}$  و  $RMSE$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i - T_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\overline{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i / n \quad (10)$$

متغیرهای رابطه فوق نیز قبلاً تعریف شده‌اند.



شکل ۸. توزیع فراوانی خطا در تخمین زمان سفر پیوندها

## ۵- نتیجه گیری

اهمیت بالای زمان سفر برای ارزیابی کارایی شبکه‌های حمل‌ونقل و سیستم‌های مدیریت ترافیک مربوط به آن از یک طرف و جمع‌آوری این داده‌ها از طریق روش‌های پرهزینه و محدود در داخل کشور از طرف دیگر، انجام مطالعه در زمینه تخمین زمان سفر با استفاده از روش ارزان و دقیق سامانه موقعیت‌یاب جهانی را که داده‌های آن نیز به وفور در دسترس هستند؛ ضروری می‌سازد. از این رو در این مقاله به تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های GPS در سه مسیر درون‌شهری پرداخته شد. در این مطالعه ابزاری کاربر-پسند برای تخمین زمان سفر با استفاده از داده‌های GPS تاریخچه زمانی با متوسط فاصله زمانی ۱۲۰ ثانیه معرفی شد. این روش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده و از توابع و دستورات GIS در آن استفاده شده است و به دلیل سازگاری آن با نرم افزار ArcGIS این قابلیت را دارد که علاوه بر اجرای مستقیم، به صورت یک جعبه ابزار به محیط نرم‌افزار ArcGIS اضافه شود تا حتی کاربران غیره متخصص نیز بتوانند به سهولت از آن استفاده کنند. این مطالعه اولین ابزار مبتنی بر GIS برای تخمین زمان سفر را که از داده‌های GPS استفاده می‌کند؛ ارائه کرد. نتایج مرحله تطبیق به نقشه و استنتاج مسیر این پژوهش، قابلیت بالای روش ارائه شده را در شناسایی پیوندهای واقعی پیموده شده نشان داد. به طوری که بیش از ۹۱/۰۶ درصد پیوندها به درستی شناسایی شدند. بر همین اساس این مطالعه قابلیت

الگوریتم کوتاهترین مسیر نرم‌افزار GIS در استنتاج مسیر را که در مطالعات قبل برای داده‌های با بسامد بالا استفاده شده بود، برای داده‌های با بسامد کم تأیید کرد. بخش عمده خطای ۸/۹۴ درصد مربوط به شناسایی پیوندها، به بخش‌هایی از شبکه مربوط می‌شد که در آن پیوندهای کوتاه و موازی به صورت نواحی شطرنجی در کنار یکدیگر واقع شده‌اند و از این رو عمده خطاهای شناسایی مسیر به صورت انتخاب پیوند موازی مجاور پیوند اصلی بوده است که بر این اساس می‌تواند به علت موازی و مجاور بودن با پیوند اصلی تا حدودی از میزان خطایی که در اثر شناسایی نادرست مسیر بوجود می‌آید کاسته و در نتیجه به بهبود دقت تخمین زمان سفر مسیر کمک کند. همچنین وقوع خطاهای شناسایی مسیر در این نواحی نوید بخش آن است که در صورت بکارگیری این روش برای شبکه معابر برون‌شهری بتوان به دقت بالایی در شناسایی مسیرها و در نتیجه برآوردهای زمان سفر رسید. زیرا در شبکه معابر برون‌شهری، نواحی شطرنجی با پیوندهای کوتاه و موازی هم در مقایسه با معابر درون‌شهری کمتر است. برای نواحی شطرنجی شبکه معابر درون‌شهری پیشنهاد می‌شود که تحلیل برای داده‌های با فاصله زمانی کوتاه‌تر مانند ۶۰ ثانیه انجام شود. بخش دوم نتایج مربوط به تخمین زمان سفر پیوندها بود. نتایج مطالعه دقت بالای روش در تخمین زمان سفر پیوندها را نشان داد به طوری که زمان سفر ۷۰ درصد پیوندها با خطای کمتر از ۱۰ درصد برآورد شدند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر مقادیر خطا در تخمین زمان سفر نیز در آن بخش‌هایی از

- 13- Topological
- 14- Dempster-Shafer's Theory
- 15- Heading (Bearing)
- 16- Incremental Method
- 17- Spatial
- 18- Temporal
- 19- Shockwave
- 20- Automatic Number Plate Recognition
- 21- Near Real-Time
- 22- Planar Network Model
- 23- Route Analysis Tool
- 24- Aggregation
- 25- Mean Absolute Percentage Error
- 26- Normalized Root Mean Square Error

## ۷- مراجع

- Antoniou, C., Balakrishna, R., & Koutsopoulos, H. N. (2011). A synthesis of emerging data collection technologies and their impact on traffic management applications. *European Transport Research Review*, 3(3), 139-148.
- Aultman-Hall, L., & Du, J. (2006). Using spatial analysis to estimate link travel times on local roads.
- Axelsson, J. (2015). Enabling comparison of travel times for taxi and public transport.
- Bernstein, D., & Kornhauser, A. (1998). An introduction to map matching for personal navigation assistants.
- Bouju, A., Stockus, A., Bertrand, R., & Boursier, P. (2002). Location-based spatial data management in navigation systems. *Intelligent Vehicle Symposium*, IEEE.
- Brakatsoulas, S., Pfoser, D., Salas, R., & Wenk, C. (2005). On map-matching vehicle tracking data. *Proceedings of the 31st international conference on Very large data bases*.
- Byon, Y., Shalaby, A., & Abdulhai, B. (2006). Travel time collection and traffic monitoring via GPS technologies. *Intelligent Transportation Systems Conference*, ITSC'06. IEEE.
- Chen, M., & Chien, S. (2000). Determining the number of probe vehicles for freeway travel time estimation by microscopic simulation. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board* (1719), 61-68.
- Chen, W., Yu, M., Li, Z., & Chen, Y. (2003). Integrated vehicle navigation system for urban applications.
- Chung, E.-H., & Shalaby, A. (2005). A trip reconstruction tool for GPS-based personal travel surveys. *Transportation Planning and Technology*, 28(5), 381-401.
- Correa, D., & Ozbay, K. (2024). Urban path travel time estimation using GPS trajectories from high-

شبکه اتفاق می‌افتد که پیوندهای با طول کوتاه به صورت شطرنجی در سطح قابل توجهی در کنار یکدیگر واقع شده‌اند. شاید بتوان گفت که در این بخش‌های شبکه دو عامل اصلی خطا در تخمین زمان سفر وجود داشته باشد. مورد اول این است که در این مناطق میزان خطا در شناسایی پیوندهای صحیح بیشتر از سایر بخش‌های شبکه است. به عبارت دیگر ممکن است بخش قابل توجهی از پیوندهای پیموده شده به درستی شناسایی نشوند. در این صورت مسیری که زمان سفر آن محاسبه می‌شود ممکن است تفاوت زیادی با مسیر اصلی داشته و از این رو زمان سفر آن با زمان سفر واقعی تفاوت قابل توجهی داشته باشد. زیرا در این شرایط داده‌های زمان سفر ابتدا و انتهای پیوندها نمی‌توانند معیار اعتبارسنجی قرار گیرند و مقایسه مقادیر برآورد شده با این داده‌ها خود می‌تواند باعث انحراف بیشتر شده و مقدار خطا را حتی بیشتر نشان دهد. مورد دوم به کوتاه بودن طول پیوندها مربوط می‌باشد. پیوندهای کوتاه معمولاً زمان سفر کمتری دارند. از این رو داشتن مقدار کمی خطا در برآورد زمان سفر واقعی یک پیوند کوتاه، می‌تواند در حالتی که به صورت درصد بیان می‌شود، خطا را به صورت مقادیر بزرگ به نظر آورد. از این رو ممکن است که به کارگیری روش ارائه شده برای شبکه معابر برون‌شهری به نتایج دقیقتری منجر شود. به طور کلی مقایسه نتایج این مطالعه در تخمین زمان سفر پیوندها با نتایج برخی مطالعات پیشین، دقت بالای روش ارائه شده را تایید کرد.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود:

- در مسیرهایی که امکان جمع‌آوری داده از منابعی دیگر مانند بلوتوث و شناس‌گرهای حلقه‌ای وجود دارد می‌توان زمان سفر را با استفاده از روش این پایان‌نامه تخمین زد و سپس نتایج بدست آمده را با نتایج این منابع مقایسه کرد.
- دقت این روش در ساعات تراکم و غیر تراکم بررسی شود.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Online
- 2- Stationary Sensors
- 3- Loop Detectors
- 4- Global Positioning System
- 5- Geographic Information System
- 6- Frequent
- 7- Sparse
- 8- Map Matching
- 9- Path Inference
- 10- Historical
- 11- Post-Processing Map Matching
- 12- Visualizing

- frequency probe vehicle data. *Transportation Research Part B: Methodological*, 53, 64-81.
- Jie, L., & Meng-yin, F. (2003). Research on route planning and map-matching in vehicle GPS/dead-reckoning/electronic map integrated navigation system. *Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. IEEE*.
- Khademi, N., Rajabi, M., Mohaymany, A. S., & Samadzad, M. (2016). Day-to-day travel time perception modeling using an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) [journal article]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 5(1), 25-52.
- Li, L., Quddus, M., & Zhao, L. (2013). High accuracy tightly-coupled integrity monitoring algorithm for map-matching. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 13-26.
- Li, Y., & McDonald, M. (2002). Link travel time estimation using single GPS equipped probe vehicle. *Intelligent Transportation Systems, Proceedings*.
- Liu, X., Liu, K., Li, M., & Lu, F. (2017). A ST-CRF map-matching method for low-frequency floating car data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(5), 1241-1254.
- Lou, Y., Zhang, C., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W., & Huang, Y. (2009). Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories. *Proceedings Of The 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*.
- Meng, Y., Chen, W., Li, Z., Chen, Y., & Chao, J. C. (2002). A simplified map-matching algorithm for in-vehicle navigation unit. *Geographic Information Sciences*, 8(1), 24-30.
- Quddus, M. A. (2006). High integrity map matching algorithms for advanced transport telematics applications. *Imperial College London*.
- Quddus, M. A., Ochieng, W. Y., & Noland, R. B. (2007). Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5), 312-328.
- Quddus, M. A., Ochieng, W. Y., Zhao, L., & Noland, R. B. (2003). A general map matching algorithm for transport telematics applications. *GPS Solutions*, 7(3), 157-167.
- Rahmani, M. (2015). *Urban Travel Time Estimation from Sparse GPS Data: An Efficient and Scalable Approach* KTH Royal Institute of Technology].
- Rahmani, M., Jenelius, E., & Koutsopoulos, H. N. (2013). Route travel time estimation using low-frequency floating car data. *Intelligent sampling-rate ridesourcing services. Journal of Intelligent Transportation Systems*, 28(2), 267-282.
- Dalumpines, R. (2014). GIS-based episode reconstruction using GPS data for activity analysis and route choice modeling.
- de Jong, G., & Kouwenhoven, M. (2020). Value of travel time and travel time reliability. In N. Mouter (Ed.), *Advances in Transport Policy and Planning* Academic Press, Vol. 6, 43-74.
- El Najjar, M. E., & Bonnifait, P. (2005). A road-matching method for precise vehicle localization using belief theory and kalman filtering. *Autonomous Robots*, 19(2), 173-191.
- Ghandeharioun, Z., & Kouvelas, A. (2022). Link Travel Time Estimation for Arterial Networks Based on Sparse GPS Data and Considering Progressive Correlations. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 3, 679-694.
- Greenfeld, J. S. (2002). Matching GPS observations to locations on a digital map. *81th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- Hashemi, M., & Karimi, H. A. (2014). A critical review of real-time map-matching algorithms: Current issues and future directions. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 153-165.
- Hashemi, M., & Karimi, H. A. (2016). A weight-based map-matching algorithm for vehicle navigation in complex urban networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(6), 573-590.
- Hellinga, B., Izadpanah, P., Takada, H., & Fu, L. (2008). Decomposing travel times measured by probe-based traffic monitoring systems to individual road segments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(6), 768-782.
- Herrera, J. C., Work, D. B., Herring, R., Ban, X. J., Jacobson, Q., & Bayen, A. M. (2010). Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), 568-583.
- Hesheng, Z., Yi, Z., Huimin, W., & Dong-cheng, H. (2007). Estimation approaches of average link travel time using GPS data. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 37(3), 533-537.
- Hunter, T., Abbeel, P., & Bayen, A. M. (2013). The path inference filter: model-based low-latency map matching of probe vehicle data. In *Algorithmic Foundations of Robotics X*, Springer, 591-607.
- Izadpanah, P., Hellinga, B., & Fu, L. (2011). Real-time freeway travel time prediction using vehicle trajectory data.
- Jenelius, E., & Koutsopoulos, H. N. (2013). Travel time estimation for urban road networks using low

- Velaga, N. R., Quddus, M. A., & Bristow, A. L. (2009). Developing an enhanced weight-based topological map-matching algorithm for intelligent transport systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(6), 672-683.
- Wang, P.-C., Hsu, Y.-T., & Hsu, C.-W. (2021). Analysis of waiting time perception of bus passengers provided with mobile service. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145, 319-336.
- White, C. E., Bernstein, D., & Kornhauser, A. L. (2000). Some map matching algorithms for personal navigation assistants. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1-6), 91-108.
- Yang, D., Cai, B., & Yuan, Y. (2003). An improved map-matching algorithm used in vehicle navigation system. *Intelligent Transportation Systems*, Proceedings. IEEE,
- Zheng, F., & van Zuylen, H. (2010). Comparison of urban link travel time estimation models based on probe vehicle data. In *Traffic and Transportation Studies 2010*, 615-626.
- Zheng, F., & Van Zuylen, H. (2013). Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 145-157.
- Zheng, Y., & Quddus, M. A. (2011). Weight-based shortest-path aided map-matching algorithm for low-frequency positioning data.
- Zhou, J. (2005). A three-step general map matching method in the GIS environment: Travel/transportation study perspective. *UCGIS Summer Assembly 2005*. Wyoming.
- Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on.*
- Rahmani, M., Jenelius, E., & Koutsopoulos, H. N. (2015). Non-parametric estimation of route travel time distributions from low-frequency floating car data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 343-362.
- Rahmani, M., & Koutsopoulos, H. N. (2013). Path inference from sparse floating car data for urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 30, 41-54.
- Rahmani, M., Koutsopoulos, H. N., & Jenelius, E. (2017). Travel time estimation from sparse floating car data with consistent path inference: A fixed point approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85, 628-643.
- Sanaullah, I., Quddus, M., & Enoch, M. (2016). Developing travel time estimation methods using sparse GPS data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(6), 532-544.
- She, X., He, Z., Nie, P., Zeng, W., Cen, X., & Dai, X. (2012). Online map-matching framework for floating-car data with low sampling rate in urban road network.
- Srinivasan, D., Cheu, R. L., & Tan, C. W. (2003). Development of an improved ERP system using GPS and AI techniques. *Intelligent Transportation Systems*, Proceedings. IEEE.
- Taylor, G., Brunson, C., Li, J., Olden, A., Steup, D., & Winter, M. (2006). GPS accuracy estimation using map matching techniques: Applied to vehicle positioning and odometer calibration. *Computers, Environment And Urban Systems*, 30(6), 757-772.
- Turner, S. M., Eisele, W. L., Benz, R. J., & Holdener, D. J. (1998). Travel time data collection handbook.

# Urban Travel Time Estimation Using Low-Frequency GPS Data

*Alireza Ganjkhanloo, Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering,  
Tehran University, Tehran, Iran.*

*Afshin Shariat Mohaymany, Professor, School of Civil Engineering,  
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mojtaba Rajabi-Bahaabadi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Yazd University, Yazd, Iran.*

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

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

Today, due to the advancement of technology, the spatial data obtained from the Global Positioning System can be used to estimate the travel time in the various components of the urban road network. In practice, spatial data from the Global Positioning System is often recorded with a low frequency, on average, every one or two minutes. This paper aims to provide a GIS-based tool for estimating travel time using low-frequency data from the Global Positioning System. To evaluate the accuracy of the proposed tool, low-frequency data gathered on three routes in Tehran was used. These data were collected using cell phones. To estimate the travel time of the links of each path, first, the data will be matched to the digital network at intervals of 120 seconds. Then, the path traveled between these map-matched points is identified. Subsequently, the average travel time of each link is estimated and compared with the actual travel time of the links. The results of this study indicate that the proposed method can highly infer the correct paths. On average, over 91.06% of the links traveled by vehicle are identified correctly. A comparison of estimated travel times with actual values indicates that link travel times are estimated accurately using the GIS-based tool.

**Keywords:** Path Inference, Travel Time Estimation, Map Matching, Geographic Information System, Global Positioning System