# برآورد سهم مؤلفه‌های اصلی تغییرپذیری زمان سفر با استفاده از تجزیه واریانس

**مقاله علمی-پژوهشی**

مجتبی رجبی بهاءآبادی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mojtaba.rajabi@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵
صفحه ۲۷۶-۲۶۵

**چکیده**

***نوسانات در تقاضای سفر و عدم قطعیت در عرضه حمل‌ونقل سبب می‌شود زمان سفر ماهیتی غیرقطعی داشته باشد. عدم قطعیت (تغییرپذیری) در زمان سفر را می‌توان ناشی از سه مؤلفه اصلی، تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی و تغییرپذیری روز-به-روز برشمرد. در پژوهش‌های پیشین، روشی جهت برآورد سهم هریک از مؤلفه‌های اصلی در میزان تغییرپذیری زمان سفر ارائه نشده است. براین‌اساس، در این مطالعه تلاش می‌شود روشی برای تعیین سهم هر یک از مؤلفه‌های پیشگفته در تغییرپذیری کل زمان سفر با استفاده از تجزیه واریانس کل داده‌های زمان سفر به مؤلفه‌های اصلی ارائه شود. برای بررسی کاربست‌پذیری روش پیشنهادی از داده‌های تاریخچه‌زمانی زمان سفر حاصل از سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس‌های خط آزادی-ونک شرکت اتوبوس‌رانی تهران استفاده شده است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد هر سه مؤلفه نقش بسزایی در تغییرپذیری کل زمان سفر دارند. بر اساس داده‌های زمان سفر استفاده‌شده در این مطالعه، سهم مؤلفه‌های تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، بازه زمانی-به-بازه زمانی و روز-به-روز، به ترتیب برابر با ۳۶/۱،۱۵/۸ و ۲۲/۳ درصد و سهم سایر عوامل (اثر متقابل مؤلفه‌های بازه زمانی-به-بازه زمانی و روز-به-روز) برابر با ۲۵/۸ درصد است. با توجه به سهم قابل توجه هر یک از سه مؤلفه تغییرپذیری زمان سفر پیشنهاد می‌شود در تحلیل‌های مرتبط با قابلیت اطمینان زمان سفر، همواره نوع مؤلفه یا مؤلفه‌های مورد بررسی و چگونگی تجمیع داده‌ها ذکر شوند.***

**واژه‌های کلیدی:** تغییرپذیری زمان سفر، تجزیه واریانس، قابلیت اطمینان زمان سفر

## ۱- مقدمه

زمان سفر عنصری کلیدی در تصمیم‌گیری‌های مسافران به شمار می‌آید؛ به‌طوری که در بسیاری از مدل‌های حمل‌ونقلی، زمان سفر به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه هزینه از دیدگاه مسافر در نظر گرفته می‌شود (Khademi et al., 2016). زمان سفر در هر کمان شبکه از برهم‌کنش و اثر متقابل تقاضای سفر و عرضه حمل‌ونقل حاصل می‌شود. پرواضح است که تقاضای سفر در روزهای مختلف سال و زمان‌های مختلف روز ثابت نیست. همچنین، عرضه فراهم‌شده توسط تسهیلات حمل‌ونقلی نیز به دلایلی همچون تصادفات، تغییر شرایط جوی، انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری راه و تغییر تنظیمات ابزارهای کنترل ترافیک تغییر می‌کند. براین‌اساس، با توجه به نوسان‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در تقاضای سفر و تغییرات در عرضه فراهم‌شده توسط تسهیلات حمل‌ونقلی، می‌توان نتیجه گرفت که زمان سفر در هر یک از کمان‌های شبکه، همواره مقدار ثابتی ندارد (van Lint et al., 2008). به بیانی شیواتر، یک مسافر در روزهای مختلف سال و در زمان‌های مختلف روز، زمان سفرهای متفاوتی را در یک کمان از شبکه به دلیل نوسانات در تقاضایِ سفرِ آن کمان یا تغییرات در عرضه آن کمان تجربه می‌کند. این بدین معنی است که زمان سفر، ماهیتی

غیرقطعی یا به عبارتی دیگر تغییرپذیر دارد.

علاوه‌بر زمان سفر، تغییرپذیری در زمان سفر نیز یک معیار مهم در تصمیم‌گیری‌های مسافران (انتخاب مسیر، انتخاب زمان شروع سفر، شیوه سفر و غیره) و ارزیابی عملکرد تسهیلات حمل‌ونقلی است. برای مثال، جمعه‌پور (۱۳۹۳) به بررسی میزان تاثیر تغییرپذیری زمان‌سفر بر انتخاب مسیر مسافران در سفرهای کاری و تحصیلی صبحگاهی پرداخت. براساس نتایج مطالعه پیشگفته، میزان تمایل به پرداخت هزینه جهت کاهش تغییرات غیرمنتظره زمان سفر ۲۲۸۲٤ ریال بر ساعت (درسال ۱۳۹۳) است. مویلان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی مناسب‌بودن شاخص انحراف معیار زمان سفر جهت مدل‌سازی رفتاری انتخاب مسیر مسافران پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که انحراف‌معیار زمان‌سفر ممکن است شاخص مناسبی جهت درنظرگرفتن تاثیر تغییرپذیری زمان‌سفر بر انتخاب مسیر مسافران نباشد (Moylan et al., 2022). همچنین، برخی از پژوهش‌های پیشین با استفاده از داده‌های واقعی نشان داده‌اند مسافران در تصمیم‌گیری‌هایشان برای عامل تغییرپذیری در زمان سفر نسبت به عامل میزان زمان سفر، اهمیت بیشتری قائل هستند (Bates et al., 2001; Carrion et al., 2012). خواننده محترم جهت مطالعه بیشتر در زمینه روش‌های متداول مدل‌سازی انتخاب‌های مسافران با مدنظر قراردادن عامل تغییرپذیری زمان سفر به مطالعه لی و هنشر (۲۰۲۰) ارجاع داده می‌شود (Li et al., 2020). افزون‌بر این، همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد در برخی از پژوهش‌ها، تغییرپذیری در زمان سفر به عنوان یک معیار مهم جهت ارزیابی عملکرد یک سیستم حمل‌ونقل درنظر گرفته شده است (de Jong et al., 2015; Taylor, 2017).

با توجه به اهمیت تغییرپذیری زمان سفر، در پژوهش‌های مختلفی تلاش شده است شاخص‌هایی جهت اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری زمان سفر ارائه گردد. این شاخص‌ها اصطلاحاً شاخص‌های «قابلیت اطمینان زمان سفر»[1] نامیده می‌شوند. به‌طور کلی،«قابلیت اطمینان زمان سفر» با تغییرپذیری زمان سفر رابطه معکوس دارد؛ به‌طوریکه، هرچه میزان تغییرپذیری زمان سفر بیشتر شود، قابلیت اطمینان زمان سفر کاهش می‌یابد. در راستای اندازه‌گیری تغییرپذیری زمان‌سفر، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. برای مثال، لُمکس و همکاران (۲۰۰۳)، چندین شاخص منجمله شاخص‌های متداول ضریب تغییرات[2]، زمان حائل[3] و زمان برنامه‌ریزی[4] را جهت اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری زمان سفر پیشنهاد دادند (Lomax et al., 2003). شاخص زمان حائل از تقسیم اختلاف بین صدک نود توزیع احتمال زمان سفر و میانگین زمان سفر بر میانگین زمان سفر بدست می‌آید. در مقابل، شاخص زمان برنامه‌ریزی به صورت نسبت صدک نود توزیع احتمال زمان سفر به زمان سفر جریان آزاد تعریف می‌شود (Pu, 2011). در پژوهش دیگری، ون‌لینت و همکاران (۲۰۰۸) چندین شاخص جهت اندازه‌گیری چولگی توزیع احتمال داده‌های زمان سفر ارائه دادند. ایشان میزان شاخص‌های پیشنهادی را با استفاده از داده‌های تاریخچه‌زمانی زمان سفر به تفکیک بازه‌های زمانی مختلف از روز و روزهای هفته محاسبه نمودند. نتایج مطالعه مذکور ضمن بیان اهمیت شاخص‌های پیشنهادی، نشان می‌دهند میزان این شاخص‌ها در بازه‌های مختلف زمانی روز و روزهای مختلف هفته تفاوت محسوسی دارند (van Lint et al., 2008). یازیسی و همکاران (۲۰۱۲) از داده‌های زمان سفر بدست‌آمده از سامانه موقعیت‌یاب تاکسی‌های شهر نیویورک جهت بررسی تغییرپذیری در زمان سفر در راه‌های شهری استفاده کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان می‌دهد که میزان شاخص‌های اندازه‌گیری تغییرپذیری زمان سفر به بازه زمانی تحلیل و روز تحلیل وابسته است (Yazici et al., 2012). مظلومی و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی عوامل موثر بر تغییرپذیری روز-به-روز زمان سفر در حمل‌ونقل همگانی پرداختند. نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد عواملی همچون طول خط اتوبوس، تعداد ایستگاه‌ها، تقاطعات موجود در مسیر یک خط اتوبوس و کاربری زمین می‌تواند بر میزان تغییرپذیری زمان سفر یک خط اتوبوس تاثیر گذارد. علاوه براین، طبق نتایج مطالعه پیشگفته، میزان تغییرپذیری زمان سفر در دوره اوج صبح بیشتراز دوره غیراوج است. در مطالعه دیگری، ما و همکاران (۲۰۱٦) با استفاده از داده‌های زمان‌سفر یک خط اتوبوس تلاش کردند مناسب‌ترین توزیع احتمال جهت مدل‌سازی ماهیت تغییرات روز-به-روز زمان سفر را تعیین کنند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که توزیع ترکیبی نرمال نسبت به توزیع‌های احتمال تک-مدی (مانند توزیع نرمال) دقت بیشتری در برآورد توزیع احتمال زمان سفر خط اتوبوس دارد (Ma et al., 2016). رجبی بهاءآبادی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی قابلیت اطمینان

زمان سفر یک خط اتوبوس در تهران پرداختند. در این راستا، شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر (برای مثال، ضریب تغییرات، زمان حائل) به تفکیک روزهای هفته و ساعات روز محاسبه شدند. علاوه‌بر این، توزیع احتمال زمان سفر خط اتوبوس نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه پیشگفته نشان می‌دهد که توزیع‌های ترکیبی می‌توانند با دقت مناسبی توزیع زمان سفر را مدل‌سازی نمایند. هارشا و مولانگی (۲۰۲۲) به بررسی توزیع احتمال زمان سفر برای مدل‌سازی تغییرپذیری زمان سفر پرداختند. در مطالعه مذکور، تجمیع زمانی داده‌های زمان سفر در سه سطح ۱) ۱۵ دقیقه، ۲) ۳۰ دقیقه و ۳) ۶۰ دقیقه انجام شده است. نتایج مطالعه ضمن تایید ماهیت تغییرپذیر زمان سفر نشان می‌دهد توزیع احتمال «مقدار حدی تعمیم‌یافته»[۵] بهترین برازش را بر داده‌های زمان سفر دارد (Harsha et al., 2022). کیم و مهمسنی (۲۰۱٤) جهت مدل‌سازی توأمان تغییرات روز-به-روز و بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی زمان سفر از یک مدل ترکیبی مبتنی بر توزیع گاما-گاما-گاما بهره بردند. توزیع گاما-گاما[۶] یک توزیع احتمال مرکب است که به صورت حاصلضرب دو توزیع احتمال گاما تعریف می‌شود (Kim et al., 2014). در راستای بررسی تاثیر وضعیت آب‌وهوا بر تغییرپذیری زمان سفر، جانگ و همکاران (۲۰۲۰) از داده‌های تاریخچه‌زمانی زمان سفر بین ۱۰۰ زوج مبداء-مقصد استفاده کردند. نتایج مطالعه فوق نشان داد که رابطه مستقیمی بین شدت بارندگی و شاخص‌های تغییرپذیری زمان سفر وجود دارد؛ به طوریکه با افزایش شدت بارندگی، میزان تغییرپذیری زمان سفر نیز افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2020). چانگ و همکاران، ضمن ارائه روشی جهت استخراج میزان تغییرپذیری خودرو-به-خودرو زمان سفر، عوامل موثر بر این نوع از تغییرپذیری زمان سفر را نیز بررسی کردند( Chung et al., 2019). نتایج مطالعه پیشین نشان می‌دهد تعداد خطوط، طول راه، محدودیت‌های سرعت و وقوع تصادفات از عوامل مهم تاثیرگذار بر تغییرپذیری روز-به-روز زمان سفر هستند. در پژوهشی دیگر، رجبی بهاءآبادی و همکاران (۲۰۱۹) دو شاخص جدید مبتنی بر انحراف از زمان‌سفر مورد انتظار ارائه دادند. شاخص‌های ارائه‌شده در پژوهش پیشگفته قادرند بین زود رسیدن و دیر رسیدن مسافر به مقصد سفر تمایز قائل شوند. همچنین، این شاخص‌ها می‌توانند نگرش مسافر نسبت به زود رسیدن و دیر رسیدن را نیز در اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان‌سفر دخیل کنند. (Rajabi-Bahaabadi et al., 2019). رایلت و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر همه‌گیری کرونا را بر میزان تغییرپذیری زمان سفر در راه‌های شریانی شهری بررسی کردند (Rilett et al., 2021). برای این منظور، در مطالعه مذکور، میزان چندین شاخص تغییرپذیری زمان‌سفر براساس داده‌های واقعی زمان‌سفر برای یک دوره زمانی قبل و حین همه‌گیری کرونا برآورد و مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان داد که میزان تغییرپذیری زمان سفرحین دوره همه‌گیری کرونا به صورت محسوسی نسبت به دوره قبل از آن کاهش یافته است. در نهایت، زانگ و همکاران (۲۰۲۲) ضمن مرور و تشریح بسیاری از شاخص‌های ارائه‌شده در زمینه اندازه‌گیری تغییرپذیری زمان سفر، شاخص‌های موجود را به سه دسته کلی نقطه‌ای، مبتنی بر کران و مبتنی بر تابع چگالی احتمال زمان سفر تقسیم‌بندی کردند (Zang et al., 2022). با توجه به اینکه، موضوع اصلی مقاله حاضر، شاخص‌های اندازه‌گیری تغییرپذیری در زمان سفر نیست، بنابراین، خواننده محترم جهت بررسی دقیق‌تر شاخص‌های مختلف تغییرپذیری زمان‌سفر به مطالعه زانگ و همکاران (۲۰۲۲) ارجاع داده می‌شود.

طبق پژوهش‌های پیشین، تغییرپذیری در زمان سفر را می‌توان ناشی از سه مؤلفه اصلی تغییرپذیری خودرو-به-خودرو[۷]، تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی[۸] و تغییرپذیری روز-به-روز[۹] قلمداد کرد (Noland et al., 2002). منظور از تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، تفاوت زمان‌سفر وسایل‌نقلیه در عبور از یک مسیر در یک روز معین و بازه زمانی خاصی از روز است. این تفاوت ممکن است به دلایلی همچون تفاوت در رفتارهای رانندگی، مشخصات متفاوت وسایل نقلیه و غیره باشد. درمقابل، تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی بیانگر تفاوت بین زمان سفرهای یک مسیر در بازه‌های زمانی مختلف یک روز است. تفاوت در زمان سفر در بازه‌های زمانی مختلف یک روز به دلایلی همچون تفاوت در تقاضای سفر و میزان روشنایی راه رخ می‌دهد. سرانجام، تغییرپذیری روز-به-روز بیانگر تفاوت زمان سفر یک مسیر در یک بازه زمانی مشخص (مثلاً ٦:٠٠ تا ٦:١٥) در روزهای مختلف یک سال است. عواملی همچون تغییرات تقاضای سفر در روزهای مختلف سال و شرایط جوی متفاوت روزهای مختلف سال می‌تواند منجر به این نوع تغییرپذیری شود.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد طبق پژوهش‌های پیشین، تغییرپذیری در زمان سفر را می‌توان ناشی از سه مؤلفه اصلی ۱) تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، ۲) تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی و ۳) تغییرپذیری روز-به-روز قلمداد کرد. در پژوهش‌های پیشین، برآورد سهم مؤلفه‌های فوق در تغییرپذیری کل زمان سفر مورد توجه قرار نگرفته است. ازاین‌رو، نوآوری اصلی این مطالعه ارائه روشی جهت برآورد سهم مؤلفه‌های پیشگفته در تغییرپذیری کل است. به عبارتی، بر اساس روش ارائه‌شده در این مطالعه می‌توان به این سؤال پاسخ داد که چند درصد از کل تغییرپذیری در زمان سفر ناشی از مؤلفه تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، چند درصد از تغییرپذیری کل ناشی از مؤلفه تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی و چند درصد مربوط به مؤلفه خودرو-به-خودرو است.

در ادامه در این مقاله، ابتدا در بخش دوم، روش‌شناسی پژوهش بیان می‌شود. بخش سوم به تشریح داده‌های مورد استفاده در این مقاله و منطقه مورد مطالعه اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج پژوهش حاضر ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم، ضمن جمع‌بندی مطالب، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

## ۲- روش‌شناسی پژوهش

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تغییرپذیری در زمان سفر ناشی از سه مؤلفه اصلی تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی و تغییرپذیری روز-به-روز است. در مقاله حاضر، جهت تعیین سهم هر مؤلفه، تغییرپذیری کل در زمان سفر به مؤلفه‌های پیش‌گفته تجزیه می‌شود. برای این منظور فرض شود $t_{dpv}$ زمان‌سفر خودرو $v$ در بازه زمانی $p$ در روز $d$ باشد. همچنین، فرض شود $N_{pd}$ بیانگر تعداد وسایل‌نقلیه‌ای باشد که زمان‌سفر آن‌ها در بازه‌زمانی $p$ و در روز $d$ ثبت شده است. با توجه به موارد فوق، زمان سفر متوسط در روز $d$ام ($\bar{t}_{d..}$)، زمان‌سفر متوسط بازه‌زمانی $p$ ام ($\bar{t}_{.p.}$)، زمان‌سفر متوسط بازه‌زمانی $p$ در روز $d$ ($\bar{t}_{dp.}$) و زمان‌سفر متوسط در دوره تحلیل ($\bar{t}$) به‌صورت ذیل قابل تعیین است:

$$\bar{t}_{d..} = \frac{1}{PN_{pd}} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{pd}} t_{dpv} \qquad d = 1,...,D \qquad (۱)$$

$$\bar{t}_{.p.} = \frac{1}{DN_{pd}} \sum_{d=1}^{D} \sum_{v=1}^{N_{pd}} t_{dpv} \qquad p = 1,...,P \qquad (۲)$$

$$\bar{t}_{dp.} = \frac{1}{N_{pd}} \sum_{v=1}^{N_{pd}} t_{dpv} \qquad \begin{matrix} d = 1,...,D \\ p = 1,...,P \end{matrix} \qquad (۳)$$

$$\bar{t}_{...} = \frac{1}{DPN_{pd}} \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{dp}} t_{dpv} \qquad (٤)$$

در روابط فوق، $D$ بیانگر تعداد روزها در بازه‌زمانی تحلیل، $P$ بیانگر تعداد بازه‌های‌زمانی در یک روز است.

با توجه به مطالب فوق، کل تغییرپذیری در زمان سفر را می‌توان به‌صورت ذیل تعریف کرد:

$$SST = \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{pd}} \left( t_{dpv} - \bar{t}_{...} \right)^2 \qquad (۵)$$

همان‌طور که بیان شد کل تغییرپذیری در زمان سفر ($SST$) ناشی از سه مؤلفه اصلی تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی و تغییرپذیری روز-به-روز است هدف این مطالعه تعیین سهم هر مؤلفه در تغییرپذیری کل است. جهت تعیین سهم هر مؤلفه، ابتدا، رابطه (۵) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$SST = \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{pd}} \Big[ \left( \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{...} \right) + \left( \bar{t}_{.p.} - \bar{t}_{...} \right) + \left( t_{dpv} - \bar{t}_{dp.} \right) + \left( \bar{t}_{dp.} - \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{.p.} + \bar{t}_{...} \right) \Big]^2 \qquad (٦)$$

با بسط رابطه (٦) و انجام یک‌سری عملیات ریاضی، رابطه (۷) از رابطه (٦) قابل استخراج است.

$$SST = PN_{pd} \sum_{d=1}^{D} \left( \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{...} \right)^2 + DN_{pd} \sum_{p=1}^{P} \left( \bar{t}_{.p.} - \bar{t}_{...} \right)^2 + \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{pd}} \left( t_{dpv} - \bar{t}_{dp.} \right)^2 + N_{pd} \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \left( \bar{t}_{dp.} - \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{.p.} + \bar{t}_{...} \right)^2 \qquad (۷)$$

رابطه (۷) قابل تفکیک به چهار بخش به صورت ذیل است:

$$SST = SSD + SSP + SSV + SSE \qquad (۸)$$

به طوریکه:

$$SSD = PN_{pd} \sum_{d=1}^{D} \left( \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{...} \right)^2 \qquad (۹)$$

$$SSP = DN_{pd} \sum_{p=1}^{P} \left( \bar{t}_{.p.} - \bar{t}_{...} \right)^2 \qquad (۱۰)$$

$$SSV = \sum_{d=1}^{D} \sum_{p=1}^{P} \sum_{v=1}^{N_{pd}} \left( t_{dpv} - \bar{t}_{dp.} \right)^2 \qquad (۱۱)$$

$$SSE = N_{pd}\sum_{d=1}^{D}\sum_{p=1}^{P}\left(\bar{t}_{dp.} - \bar{t}_{d..} - \bar{t}_{.p.} + \bar{t}_{...}\right)^2 \qquad (۱۲)$$

در روابط (۹) تا (۱۲)، $SSD$ نماینده مؤلفه تغییرپذیری روز-به-روز، $SSP$ نماینده مؤلفه تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی، $SSV$ معادل مؤلفه تغییرپذیری خودرو-به-خودرو و $SSE$ بیانگر سایر عوامل تاثیرگذار بر تغییرپذیری زمان سفر (اثر متقابل[۷] مؤلفه روز-به-روز و مؤلفه بازه زمانی-به-بازه زمانی) است.

برای تعیین سهم هر یک از مؤلفه‌های فوق در تغییرپذیری کل (بر حسب درصد)، کافی است میزان هر مؤلفه بر تغییرپذیری کل تقسیم کرد؛ به عبارتی:

$$C_D = 100\frac{SSD}{SST} \qquad (۱۳)$$

$$C_P = 100\frac{SSP}{SST} \qquad (۱۴)$$

$$C_V = 100\frac{SSV}{SST} \qquad (۱۵)$$

$$C_E = 100\frac{SSE}{SST} \qquad (۱۶)$$

در روابط (۱۳) تا (۱۶)، $C_D$، $C_P$، $C_V$ و $C_E$، به ترتیب به عنوان سهم مؤلفه‌های روز-به روز، بازه زمانی-به-بازه زمانی، خودرو-به-خودرو و سایر عوامل موثر بر حسب درصد در نظر گرفته می‌شوند. به عبارتی دیگر، $C_D$ درصد از تغییرپذیری کل زمان سفر ($SST$) ناشی از مؤلفه روز-به روز، $C_P$ درصد از تغییرپذیری کل زمان سفر ناشی از مؤلفه بازه زمانی-به بازه زمانی، $C_V$ درصد از تغییرپذیری کل زمان سفر ناشی از مؤلفه خودرو-به-خودرو و در نهایت $C_E$ درصد مربوط به سایر عوامل است.

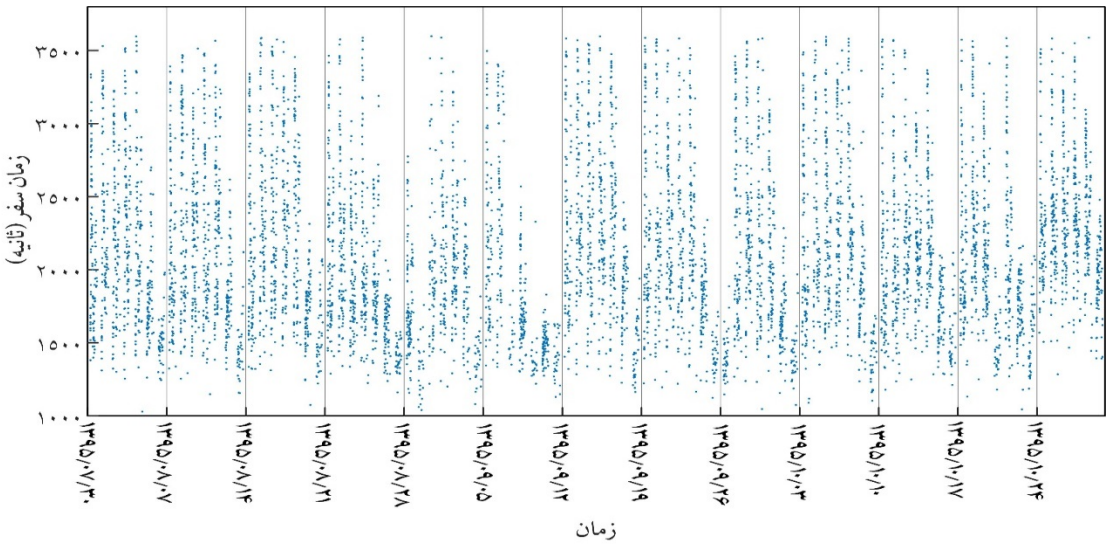
## ۳- توصیف داده‌ها و محدوده مورد مطالعه

داده‌های زمان سفر مورداستفاده در مطالعه حاضر از سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس‌های خط میدان آزادی-ونک شرکت اتوبوس‌رانی شهر تهران استخراج شده‌اند. خط اتوبوس مذکور از میدان آزادی شروع می‌شود و در میدان ونک پایان می‌یابد. طول این خط حدود ۱۳ کیلومتر است و دارای ۹ ایستگاه است. دستگاه‌های موقعیت‌یاب نصب‌شده بر روی اتوبوس‌های این خطوط، موقعیت اتوبوس‌ها را هر دو دقیقه یک‌بار به یک پایگاه داده ارسال می‌کنند. علاوه‌براین، در هنگام بازشدن و بسته‌شدن درب عقب اتوبوس در ایستگاه‌های اتوبوس، موقعیت اتوبوس مجدداً ارسال می‌شود. با توجه به اینکه زمان ورود و خروج اتوبوس به ایستگاه توسط سامانه موقعیت‌یاب ثبت می‌شود، زمان‌سفرهای مورد استفاده در مطالعه حاضر مربوط به بخشی از این خط بین دو ایستگاه اتوبوس هستند. این داده‌های در بازه زمانی سه ماهه (۱۳۹۵/۰۸/۰۱ تا ۱۳۹۵/۱۰/۳۰) جمع‌آوری شده‌اند. شایان ذکر است، زمان سفر اتوبوس شامل دو بخش اصلی ۱) مدت‌زمان توقف[۱۰] در ایستگاه‌ها و ۲) «مدت‌زمان سفر اتوبوس هنگام حرکت بین ایستگاه‌ها»[۱۱] می‌شود. با توجه به اینکه هدف از مطالعه کنونی تغییرپذیری در زمان سفر هنگام طی‌کردن کمان‌های شبکه است، لذا، تنها باید بخش دوم زمان سفر اتوبوس در برآورد سهم مؤلفه‌های تغییرپذیری مدنظر قرار گیرد. برای استخراج بخش دوم (مدت‌زمان سفر اتوبوس هنگام حرکت بین ایستگاه‌ها)، ابتدا برای هر اعزام اتوبوس، مجموع مدت زمان توقف اتوبوس در ایستگاه‌ها محاسبه شده است. در ادامه، مجموع مدت‌زمان توقف اتوبوس در ایستگاه‌ها از کل زمان سفر اتوبوس کاسته شده است.

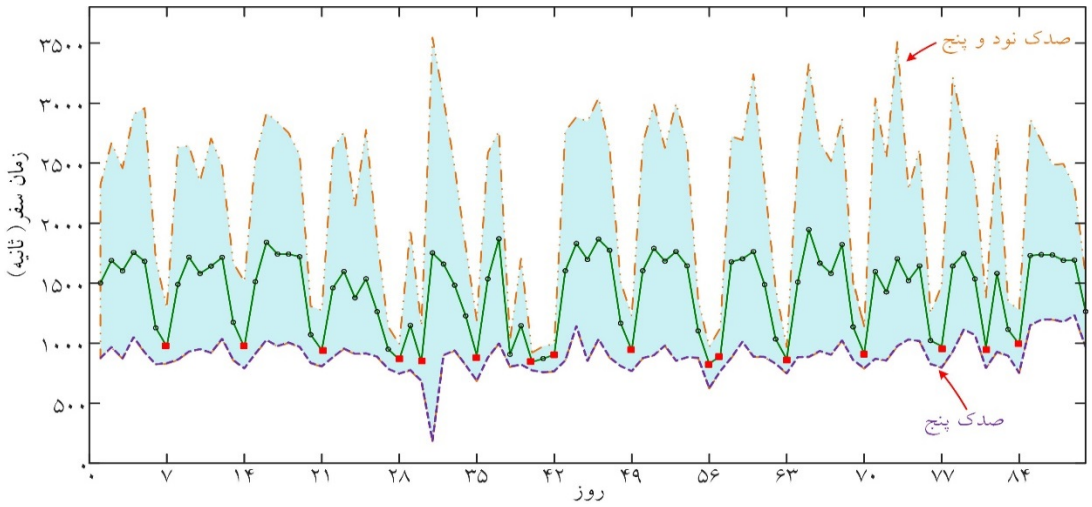
## ۴- نتایج

در این بخش، ابتدا، ماهیت تغییرپذیر زمان سفر با استفاده از داده‌های واقعی نشان داده می‌شود. در ادامه، سهم هر یک از مولفه‌های تغییرپذیری محاسبه می‌شود. در راستای تبیین ماهیت تغییرپذیر زمان سفر، داده‌های زمان سفر در بازه سه‌ماهه در شکل ۱ نمایش داده شده است. در شکل ۱، محور $y$ بیانگر میزان زمان سفر یک اتوبوس و محور $x$ بیانگر زمان‌شروع سفر اتوبوس از ایستگاه مبدأ نسبت به شروع روز ۱۳۹۵/۰۷/۳۰ است. هر نقطه در شکل ۱ متناظر با زمان سفر یک اتوبوس است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود زمان سفر در بازه زمانی سه‌ماهه، ثابت نبوده و ماهیت تغییرپذیری داشته است. برای بررسی تغییرات روز-به-روز زمان سفر، میانگین زمان سفر هر روز و بازه بین صدک پنجم و نود پنجم زمان سفر در هر روز در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، مضاف بر میانگین زمان سفر، صدک پنجم و نود و پنجم توزیع زمان سفر در روزهای مختلف متفاوت است. به بیانی دقیق‌تر، شکل ۲ به

نوعی مبین مؤلفه تغییرپذیری روز-به-روز زمان سفر است. در شکل ۲، روزهایی که با مربع قرمز رنگ متمایز شده‌اند، بیانگر روزهای تعطیل هستند. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، میانگین زمان سفر در روزهای تعطیل به‌صورت محسوسی از روزهای قبل و بعد کمتر است. شکل ۳ توزیع احتمال زمان سفر و میانگین زمان سفر در بازه‌های زمانی (ساعات) مختلف روز را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، میانگین زمان سفر و شکل توزیع احتمال زمان سفر در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است. طبق شکل ۳، توزیع احتمال زمان سفر در ساعات اوج (برای مثال، ساعت ۸:۰۰-۹:۰۰ صبح) نسبت به ساعات غیر اوج (برای مثال ۶:۰۰-۷:۰۰ صبح) پهن‌تر است. این بدین معنی است که تغییرپذیری زمان سفر در ساعات اوج بیشتر از ساعات غیر اوج است. علاوه‌بر این، طبق شکل ۳، توزیع احتمال زمان سفر مربوط به ساعات غیر اوج، اغلب تک-قله‌ای و برای ساعات اوج، اغلب چند-قله‌ای (چند-مدی) است. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که برای ساعات اوج بهتر است از توابع توزیع احتمال ترکیبی جهت مدل‌سازی ماهیت تغییرپذیر زمان سفر استفاده کرد.

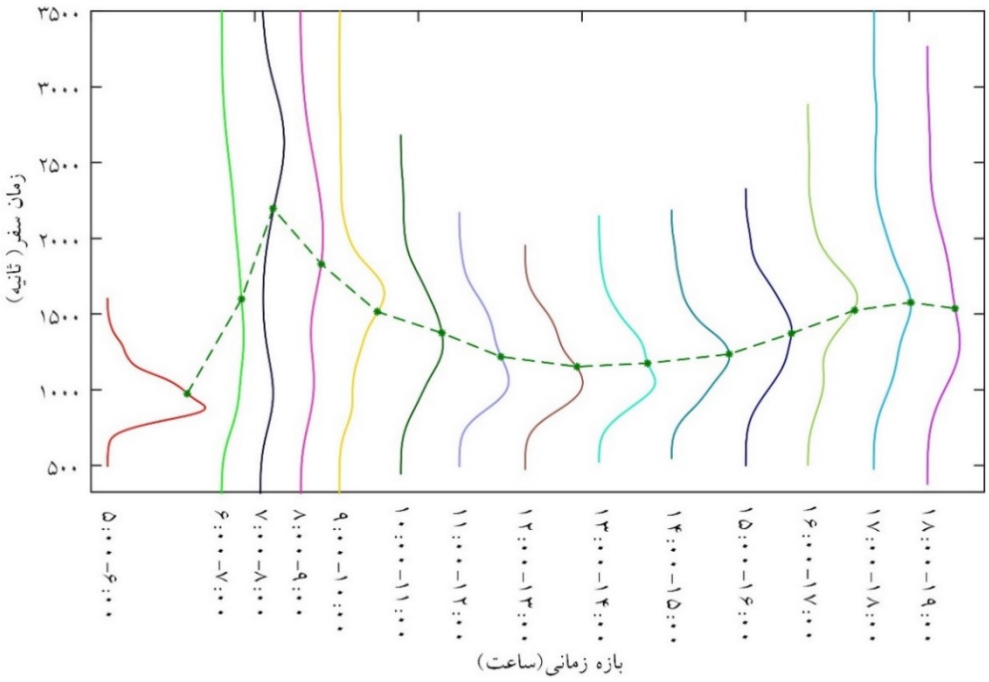



**شکل ۱. زمان سفر اتوبوس‌ها در بازه‌های زمانی مختلف**

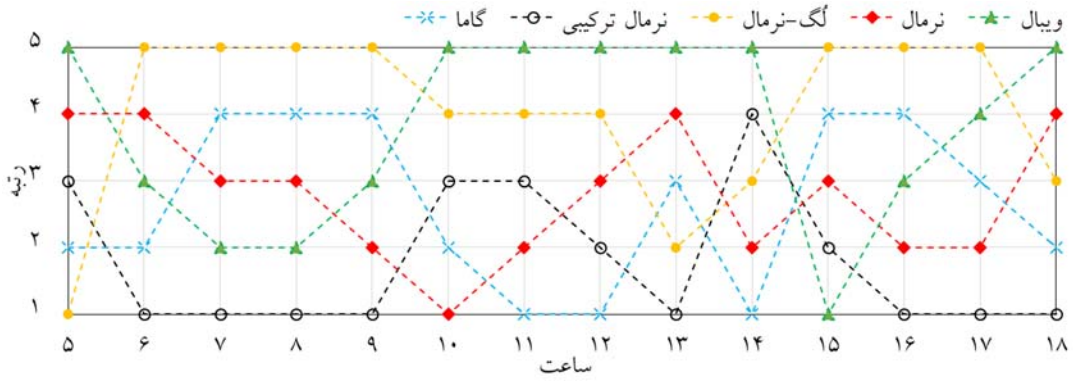



**شکل ۲. تغییرات مؤلفه روز-به-روز زمان سفر**

به منظور تعیین بهترین توزیع احتمال جهت مدل‌سازی تغییرپذیری زمان سفر، پنج نوع توزیع احتمال بر داده‌های زمان‌سفر استفاده‌شده در این مطالعه برازش داده شد. این توابع توزیع احتمال عبارتند از: نرمال، لُگ-نرمال، گاما، ویبال، و ترکیبی نرمال. در پژوهش حاضر برای تخمین پارامترهای توابع توزیع تک-قله‌ای از روش «بیشینه درست‌نمایی» و برای تخمین پارامترهای توابع توزیع ترکیبی از الگوریتم «امید ریاضی-بیشینه‌سازی»[12] استفاده شده است. همچنین، از «معیار اطلاعات آکائیک»[13] (*AIC*) برای ارزیابی میزان نیکویی برازش انواع توابع توزیع احتمال بر داده‌های زمان‌سفر استفاده شده است. به‌طوری‌که، هرچه میزان *AIC* متناظر با یک توزیع احتمال کمتر باشد، آن تابع با دقت بیشتری توزیع واقعی داده‌ها را تقریب می‌زند. در پژوهش حاضر، براساس معیار *AIC*، توابع توزیع احتمال رتبه‌بندی شدند. به‌بیانی دقیق‌تر، هرچه میزان *AIC* متناظر با یک توزیع احتمال کمتر باشد، آن توزیع حائز رتبه بهتری می‌شود؛ به‌طوری‌که، به تابع توزیع احتمالی که دارای کمترین مقدار *AIC* حاصل از برازش باشد، رتبه یک و به تابع توزیع با بیشترین مقدار *AIC*، رتبه پنج اختصاص داده شد. شکل ٤ رتبه توابع توزیع احتمال مورد بررسی را به تفکیک بازه زمانی (ساعت) نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ٤ نشان داده شده است توزیع ترکیبی نرمال به‌خصوص برای ساعات اوج (برای مثال ۱۷:۰۰ تا ۱۹:۰۰) .بهترین برازش را بر داده‌های زمان‌سفر داشته است. همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، شکل توزیع احتمال زمان سفر به‌خصوص در ساعات اوج به صورت چندقله‌ای است. با توجه به اینکه توزیع نرمال ترکیبی از ترکیب چندین توزیع نرمال ایجاد می‌شود، این توزیع نسبت به توزیع‌های احتمال تک-قله‌ای توانایی بیشتری در مدل‌سازی توزیع‌های چند قله‌ای دارد. بنابراین، دلیل برتری توزیع نرمال ترکیبی نسبت به سایر توزیع‌های مورد بررسی در این پژوهش، توانایی توزیع ترکیبی نرمال جهت مدل‌سازی ماهیت چندقله‌ای توزیع زمان سفر است.




**شکل ۳. تغییرات مؤلفه بازه زمانی-به-بازه زمانی زمان سفر**




**شکل ٤. رتبه توزیع‌های مورد بررسی**

جهت تعیین سهم مؤلفه اصلی تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، تغییرپذیری بازه‌زمانی-به-بازه‌زمانی و تغییرپذیری روز-به-روز از روابط ۱۲ تا ۱۵ استفاده شده است. جدول ۱، مجذور مربعات تغییرپذیری مرتبط با هر مؤلفه و سهم هر مؤلفه را نشان می‌دهد. طبق جدول ۱، بیشترین سهم مربوط به مؤلفه تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی و پس از آن مربوط به مؤلفه روز-به-روز و در نهایت مربوط به مؤلفه خودرو-به-خودرو است.

**جدول ۱. سهم مؤلفه‌های تغییرپذیری زمان سفر**

| مؤلفه | مجموع مربعات ($SS$) | سهم مؤلفه |
|---|---|---|
| روز-به-روز | ۳۸٤۹۰۸٦٦۷ | ٪۲۲/۳ |
| بازه زمانی-به-بازه زمانی | ٦۲۳۸۰۳۹۹۸ | ٪۳٦/۱ |
| خودرو-به-خودرو | ۲۷۱۷۰۷٤۷۲ | ٪۱٥/۸ |
| سایر | ٤٤٤٦۷۲۹٦۹ | ٪۲٥/۸ |
| مجموع | ۱۷۲٥۰۹۳۱۰٦ | ٪۱۰۰ |

برای تحلیل تغییرپذیری زمان سفر مرتبط با مؤلفه خودرو-به-خودرو، ابتدا، نیاز است تاثیر مؤلفه‌های روز-به-روز و بازه زمانی-به-بازه زمانی حذف شود. برای این منظور، اختلاف بین زمان سفر هر خودرو در بازه زمانی $p$ و روز $d$ ($t_{dpv}$) و میانگین زمان سفر وسایل در آن بازه زمانی و روز خاص ($\bar{t}_{dp.}$) محاسبه شده و بر میانگین زمان سفر در آن بازه زمانی و روز خاص تقسیم می‌شود؛ به عبارتی دیگر:

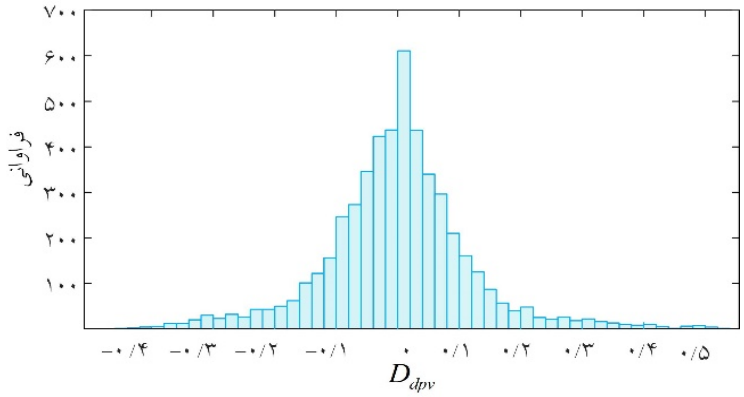
$$D_{dpv} = \frac{t_{dpv} - \bar{t}_{dp.}}{\bar{t}_{dp.}} \qquad (۱۷)$$

پس از محاسبه $D_{dpv}$ (تغییرپذیری نسبی خودرو-به-خودرو)، توزیع احتمال $D_{dpv}$ و تغییرات آن نسبت به بازه زمانی و روز هفته مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

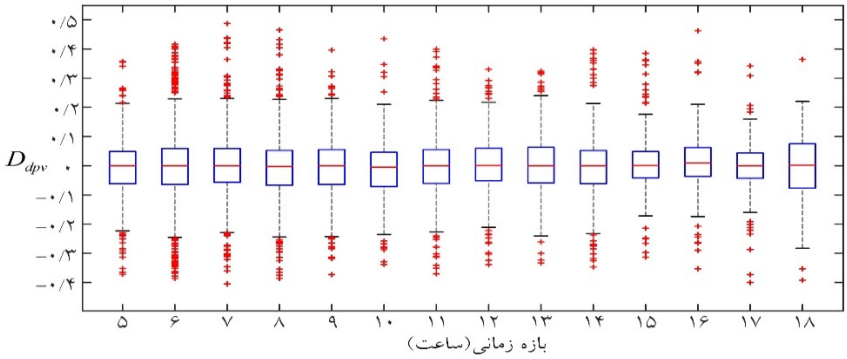
در راستای بررسی تغییرپذیری خودرو-به-خودرو، ابتدا مطابق رابطه (۱۷)، مؤلفه‌های بازه زمانی-به-بازه زمانی و روز-به-روز از تغییرپذیری کل حذف شد. شکل ۵ توزیع تغییرپذیری نسبی مؤلفه خودرو-به-خودرو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ مشهود است، توزیع فراوانی $D_{dpv}$ تقریباً متقارن است. متقارن بودن توزیع به این دلیل است برخی از وسایل نقلیه با سرعتی کمتر نسبت به میانگین سرعت و برخی وسایل با سرعتی بیشتر نسبت به میانگین سرعت حرکت می‌کنند. علاوه‌براین، طبق شکل ۵، حداکثر میزان تفاوت بین سرعت وسایل نقلیه (اتوبوس‌ها) و سرعت متوسط در آن بازه حدود ٤۰ درصد است. این میزان تغییرپذیری بین وسایل نقلیه برای خودروی شخصی ممکن است کاملاً متفاوت باشد و نیاز به مطالعات بیشتر در این زمینه است.

شکل ٦ نمودار جعبه‌ای تغییرپذیری نسبی مؤلفه خودرو-به-خودرو را به تفکیک ساعت نشان می‌دهد. طبق شکل ٦، میانه متغیر $D_{dpv}$ برابر با صفر است اما پراکنش این متغیر در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، نمودار چگالی متغیر $D_{dpv}$ به تفکیک ساعت ترسیم شده است. شکل ۷ چگالی متغیر $D_{dpv}$ به تفکیک بازه زمانی (ساعت) را نشان می‌دهد. در شکل ۷ میزان پهن‌بودن نمودار بیانگر تجمع‌داده‌ها در آن نقطه است. به عبارتی دیگر، بین فراوانی داده‌ها

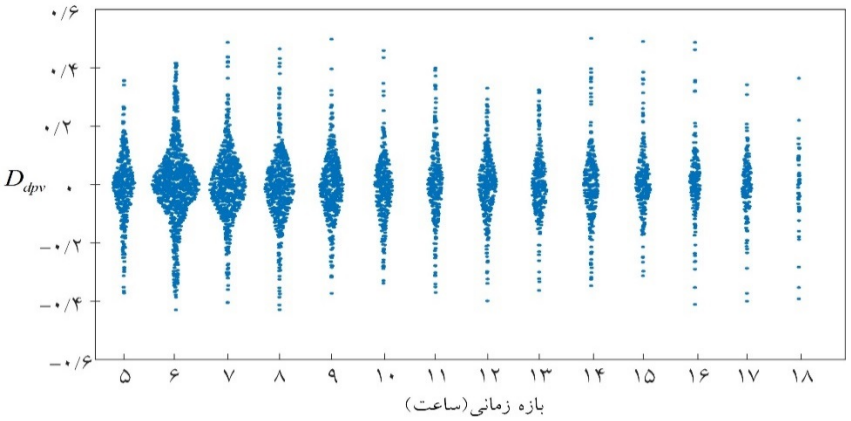
به ازای یک مقدار معین $D_{dpv}$ و پهنای نمودار در آن مقدار رابطه مستقیم وجود دارد. در حقیقت، هرچه به ازای یک مقدار مشخص $D_{dpv}$ نمودار پهن‌تر باشد، این بدین معنا است که فراوانی داده‌ها به ازای آن مقدار بیشتر است. علاوه براین، پراکنش داده‌های مرتبط با متغیر $D_{dpv}$ نیز در شکل ۷ مشخص است. مطابق شکل ۷ پراکنش داده ها در ساعات غیر اوج (۶:۰۰–۵:۰۰ یا ۱۳:۰۰–۱۴:۰۰) کمتر بوده است. کم‌تربودن تغییرات متغیر $D_{dpv}$ می‌تواند به این دلیل باشد که در ساعات غیر اوج، رانندگان اتوبوس اغلب با سرعت‌هایی نزدیک به سرعت جریان آزاد حرکت کرده‌اند، لذا پراکنش داده‌ها کمتر بوده است.




**شکل ۵. توزیع فراوانی تغییرپذیری نسبی خودرو–به–خودرو**




**شکل ٦. نمودار جعبه‌ای تغییرپذیری نسبی خودرو–به–خودرو به تفکیک بازه زمانی**




**شکل ۷. نمودار چگالی متغیر تغییرپذیری نسبی خودرو–به–خودرو به تفکیک زمان**

## ۵- نتیجه‌گیری

تغییرپذیری زمان سفر، ناشی از سه مؤلفه خودرو-به-خودرو، بازه زمانی-به-بازه زمانی و روز-به-روز است. اغلب مطالعات پیشین، به صورت موردی تنها به برخی از مؤلفه‌های سه‌گانه تغییرپذیری پرداخته‌اند؛ اما، تاکنون سهم هر یک از مؤلفه‌های پیشگفته در تغییرپذیری کل مورد بررسی قرار نگرفته است. براین‌اساس، در پژوهش حاضر روشی جهت تعیین سهم مؤلفه‌های سه‌گانه ارائه شد. برای این منظور، مجموع مربعات متناظر با تغییرپذیری کل به چهار بخش تقسیم می‌شود که سه بخش اول آن بیانگر مؤلفه‌های سه‌گانه و بخش آخر آن متناظر با سایر عوامل تاثیرگذار بر تغییرپذیری کل (برای مثال، برهم‌کنش متقابل مؤلفه‌های سه‌گانه) است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد بیشترین سهم در تغییرپذیری کل مربوط به مؤلفه بازه زمانی-به-بازه زمانی (۳۶/۱ درصد)، سپس مربوط به مؤلفه روز-به-روز (۲۲/۳) و در نهایت مربوط به مؤلفه خودرو-به-خودرو (۱۵/۸) است. همچنین، ۲۵/۸ درصد از تغییرپذیری کل، توسط سه مؤلفه پیشگفته قابل پوشش نیست و مرتبط با سایر عوامل است. لازم به ذکر است که سهم‌های برآورد شده برای هر یک از مؤلفه‌های تغییرپذیری وابسته به مشخصات مسیر (الگوی تقاضای سفر مسیر، مشخصات موثر بر ظرفیت مسیر و غیره) است و هدف از پژوهش حاضر تنها ارائه روشی جهت برآورد سهم هریک از مؤلفه‌های سه‌گانه است. لذا، بسته به مشخصات مسیر، میزان سهم هر یک از مؤلفه‌های پیشگفته ممکن است تغییر کند. شایان ذکر است با توجه به سهم بسزای هریک از مؤلفه‌های تغییرپذیری، پیشنهاد می‌شود در تحلیل‌های مرتبط با قابلیت اطمینان زمان سفر، به جای استفاده از واژه عمومی «قابلیت اطمینان زمان سفر»، نوع مؤلفه موردتحلیل نیز ذکر گردد. علاوه‌بر این، پیشنهاد می‌گردد نحوه تجمیع داده‌های زمان سفر نیز در مطالعات آینده به طور دقیق ذکر گردد. برای مثال، اگر در یک مطالعه، بازه‌های زمانی یک ساعته جهت تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر در نظر گرفته شود و داده‌های زمان سفر وسایل نقلیه در این بازه زمانی تجمیع شده و میانگین آن‌ها به عنوان نماینده آن بازه زمانی در تحلیل‌ها استفاده شود، اثر مؤلفه تغییرپذیری خودرو-به-خودرو به علت تجمیع داده‌های زمان سفر حذف خواهد شد و این ممکن است بر نتایج تحلیل تاثیر گذارد. براین‌اساس، ذکر مشخصات داده‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر یک مسیر ضروری است. تاثیر تجمیع داده‌های زمان سفر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر در مطالعات پیشین نیز با استفاده از داده‌های واقعی زمان سفر مشاهده شده است.

یکی از موارد دیگری که به عنوان هدف فرعی در این مطالعه به آن پرداخته شده است، انتخاب توزیع مناسب جهت مدل‌سازی ماهیت تغییرپذیر زمان سفر است. برای بررسی این موضوع، داده‌های واقعی زمان سفر بر چندین تابع توزیع احتمال برازش داده شدند. سپس، بر اساس «معیار اطلاعات آکائیک»، میزان مناسب بودن توابع توزیع احتمال جهت مدل‌سازی ماهیت تغییرپذیر زمان سفر مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس «معیار اطلاعات آکائیک»، توزیع ترکیبی نرمال در بیش از ۵۸ درصد موارد بهترین برازش را بر داده‌های زمان سفر داشته است. این به این دلیل است که توزیع احتمال زمان سفر به‌خصوص در ساعات اوج دارای چندین قله است؛ لذا توزیع‌های ترکیبی نسبت به توزیع‌های تک-قله‌ای (مانند توزیع نرمال) بهتر می‌توانند این ماهیت را مدل‌سازی نمایند.

برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود میزان سهم مؤلفه‌های سه‌گانه با استفاده از داده‌های زمان‌سفر خودروی شخصی در معابر شهری و برون شهری به تفکیک نوع راه تعیین شود. علاوه‌براین، پیشنهاد می‌شود تغییرپذیری کل در قالب مؤلفه‌های سه‌گانه به صورت توأمان مدل‌سازی ریاضی شود.

## ٦- پی‌نوشت‌ها

1. Travel time reliability
2. Coefficient of variation
3. Buffer index
4. Planning time index
5. Generalized extreme value
6. Vehicle-to-vehicle variability
7. Period-to-period variability
8. Day-to-day variability
9. Interaction
10. Bus waiting time
11. Bus running time
12. Expectation–maximization algorithm
13. Akaike information criterion (AIC)

## ۷- مراجع


- جمعه‌پور، جواد. (۱۳۹۳). ارزش اقتصادی قابلیت اطمینان زمان سفر در سفرهای صبحگاهی کاری و تحصیلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، *دانشگاه صنعتی شریف*.

- رجبی بهاءآبادی، مجتبی، خادمی، نوید، فروزنده، روزبه، و افشین شریعت مهیمنی (۱۳۹۷). تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس با استفاده از داده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی. *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*. ۹(۳)، ۲۹۶-۳۱۳.

-Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *37*(2-3), 191-229.

- Carrion, C., & Levinson, D. (2012). Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *46*(4), 720-741.

- Chung, W., Abdel-Aty, M., Cai, Q., & Ponnaluri, R. (2019). Method for Estimating Vehicle-to-Vehicle Travel Time Variability Models at the Link and Network Levels of Freeways/Expressways through Censoring Mechanism. *Transportation Research Record*, *2673*(5), 548-563.

- de Jong, G. C., & Bliemer, M. C. J. (2015). On including travel time reliability of road traffic in appraisal. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *73*, 80-95.

- Harsha, M., & Mulangi, R. H. (2022). Probability distributions analysis of travel time variability for the public transit system. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *11*(4), 790-803.

-Khademi, N., Rajabi-Bahaabadi, M., Mohaymany, A. S., & Samadzad, M. (2016). Day-to-day travel time perception modeling using an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS). *EURO Journal on Transportation and Logistics*, *5*(1), 25-52.

-Kim, J., & Mahmassani, H. S. (2014). A finite mixture model of vehicle-to-vehicle and day-to-day variability of traffic network travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *46*, 83-97.

- Li, Z., & Hensher, D. (2020). Understanding risky choice behaviour with travel time variability: a review of recent empirical contributions of alternative behavioural theories. *Transportation Letters*, *12*(8), 580-590.

- Lomax, T., Margiotta, R., Schrank, D., & Turner, S. (2003). *Selecting travel reliability measures.*

- Ma, Z., Ferreira, L., Mesbah, M., & Zhu, S. (2016). Modeling distributions of travel time variability for bus operations. *Journal of Advanced Transportation*, *50*(1), 6-24.

- Moylan, E. K. M., Bliemer, M. C. J., & Hossein Rashidi, T. (2022). Travellers' perceptions of travel time reliability in the presence of rare events. *Transportation*, *49*(4), 1157-1181.

Noland, R. B., & Polak, J. W. (2002). Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport reviews*, *22*(1), 39-54.

- Pu, W. (2011). Analytic Relationships between Travel Time Reliability Measures. *Transportation Research Record*, *2254*(1), 122-130.

- Rajabi-Bahaabadi, M., Shariat-Mohaymany, A., & Yang, S. (2019). Travel time reliability measures accommodating scheduling preferences of travelers. *Transportation Research Record*, *2673*(4), 708-721.

- Rilett, L. R., Tufuor, E., & Murphy, S. (2021). Arterial roadway travel time reliability and the COVID-19 pandemic. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, *147*(7), 04021034.

-Taylor, M. A. (2017). Fosgerau's travel time reliability ratio and the Burr distribution. *Transportation Research Part B: Methodological*, *97*, 50-63.

- Van Lint, J. W. C., van Zuylen, H. J., & Tu, H. (2008). Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *42*(1), 258-277.

- Yazici, M., Kamga, C., & Mouskos, K. (2012). Analysis of Travel Time Reliability in New York City Based on Day-of-Week and Time-of-Day Periods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2308*, 83-95.

- Zang, Z., Xu, X., Qu, K., Chen, R., & Chen, A. (2022). Travel time reliability in transportation networks: A review of methodological developments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *143*, 103866.

- Zhang, Q., Chen, H., Liu, H., Li, W., & Zhang, Y. (2020). Origin-destination-based travel time reliability under different rainfall intensities: an investigation using open-source data. *Journal of Advanced Transportation*, *2020*.

# Estimating the Share of the Main Components of Travel time Variability using Analysis of Variance

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

*E-mail: mojtaba.rajabi@yazd.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

**ABSTRACT**

Fluctuations in travel demand and uncertainty in transportation supply make travel time uncertain. Travel time uncertainty (variability) can be attributed to three main components: vehicle-to-vehicle variability, period-to-period variability, and day-to-day variability. Several studies developed indexes to measure travel time variability. However, no methods have been developed to estimate the contribution of the main components of variability. In this paper, we employ the analysis of variance method to determine the relative contributions of the aforementioned components to the total variability in travel time. To examine the applicability of the proposed method, real travel time data collected over 3 months is used. The results of the present study show that all three components play a significant role in the variability of travel time. Based on the travel time data used in this study, the share of vehicle-to-vehicle, period-to-period, and day-to-day variability components are 15.8, 36.1, and 22.3 percent, respectively. Moreover, 25.8 percent of total variability is contributed to the interaction between day-to-day and period-to-period components. In addition, according to the results of this research, the probability distribution of travel time is multimodal, especially in peak hour periods. Therefore, mixture distributions can model travel time variability more accurately than single distributions.

**Keywords:** Travel Time Variability, Analysis of Variance, Travel Time Reliability