

تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس با استفاده از داده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی

مجتبی رجبی بهاء‌آبادی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

نوید خادمی، استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

روزبه فروزنده، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری، تهران، ایران

افشین شریعت مهیمنی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: mojtaba_rajabi@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

چکیده:

قابلیت اطمینان زمان سفر بر عملکرد و کیفیت خدمات شبکه اتوبوس‌رانی تأثیر بسزایی دارد. در این مقاله تلاش می‌شود تا با استفاده از داده‌های زمان سفر ثبت‌شده توسط سامانه موقعیت‌یاب شرکت اتوبوس‌رانی تهران، به تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر بخشی از دو خط اتوبوس در شهر تهران پرداخته شود. در این راستا، ابتدا، انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر به کاررفته در پژوهش‌های پیشین تبیین و تشریح می‌شوند. در ادامه، با استفاده از داده‌های زمان سفر برداشت‌شده از شبکه اتوبوس‌رانی شهر تهران، تغییرات این شاخص‌ها در بازه‌های مختلف زمانی روز بررسی می‌شوند. علاوه بر این، میزان هم‌قوارگی چندین توزیع آماری با توزیع احتمال تجربی داده‌های زمان سفر بررسی می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های زمان سفر نشان می‌دهد که به‌طور کلی، تغییرپذیری زمان سفر اتوبوس در دوره اوج عصر بیشتر از دوره اوج صبح در خطوط مورد مطالعه است. همچنین، توابع توزیع احتمال بور، لگ-لوچستیک و لگ-نرمال با دقت بیشتری می‌توانند تابع توزیع احتمال زمان سفر یک مسیر اتوبوس‌رانی را تقریب بزنند. علاوه بر این، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بکارگیری توزیع‌های ترکیبی می‌تواند میزان نیکویی برازش در تخمین توزیع داده‌های زمان سفر را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم موقعیت‌یاب جهانی، شبکه‌های تصادفی و پویای ترافیکی، قابلیت اطمینان زمان سفر

۱. مقدمه

تغییرپذیری در زمان سفر، شامل سه مؤلفه اساسی است [Kieu, Bhaskar and Chung, 2014]:

۱) تفاوت زمان سفر بین وسایل نقلیه در یک بازه زمانی خاص (تغییرپذیری بین وسیله‌ای)^۴، ۲) تفاوت زمان سفر بین بازه‌های زمانی مختلف روز (تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی)^۵ و ۳) تفاوت زمان سفر بین روزهای سال (تغییرپذیری روز-به-روز)^۶. «تغییرپذیری بین وسیله‌ای» بیانگر تفاوت بین زمان سفرهای تجربه‌شده توسط رانندگان مختلف در یک بازه زمانی مشخص در یک مسیر معین است. این نوع از تغییرپذیری در زمان سفر ناشی از تفاوت در رفتار رانندگان، تفاوت در ویژگی‌های وسایل نقلیه، تأخیر چراغ راهنمایی، تأخیر حاصل از تداخل با عابر پیاده و غیره است. «تغییرپذیری بازه زمانی-به-بازه زمانی» حاکی از تفاوت بین زمان سفرهای تجربه‌شده توسط رانندگان در یک مسیر مشخص در بازه‌های زمانی مختلف روز است. عواملی همچون وقوع تصادفات ترافیکی، تغییرات در تقاضای سفر، تغییر در میزان روشنایی مسیر و غیره موجب این نوع از تغییرپذیری در زمان سفر می‌شوند. در نهایت، «تغییرپذیری روز-به-روز» بیانگر تفاوت بین زمان سفرهای تجربه‌شده در یک مسیر و در یک بازه زمانی مشخص در روزهای مختلف سال است. در این نوع تغییرپذیری در زمان سفر، عواملی مانند تغییر در شرایط جوی، وقوع تصادفات ترافیکی، نوسانات روز-به-روز در تقاضای سفر و غیره دخیل هستند [Kieu, Bhaskar and Chung, 2014].

برای اندازه‌گیری و تعیین میزان قابلیت اطمینان زمان سفر، شاخص‌های گوناگونی در دو دهه گذشته ارائه شده است. از شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان سفر می‌توان به شاخص‌های «انحراف معیار استاندارد»^۷، «ضریب تغییرات»^۸، «زمان حائل»^۹، «چولگی»^{۱۰} و «زمان برنامه‌ریزی»^{۱۱} اشاره کرد.

به‌منظور در نظر گرفتن ماهیت احتمالی زمان سفر در مدل‌سازی‌های حمل‌ونقلی، تعیین نوع و پارامترهای تابع توزیع احتمال زمان سفر یک مسیر یا کمان از شبکه ضروری است. در پژوهش‌های پیشین توابع توزیع احتمال «نرمال»، «لگ-نرمال»^{۱۲}، «ویبول»^{۱۳}، «بور»^{۱۴}، «گاما»^{۱۵} و «لگ-لوچستیک»^{۱۶} برای مسیرهای

زمان سفر در کمان‌های یک شبکه متأثر از برهم‌کنش تقاضای سفر در کمان‌ها و ظرفیت آن کمان‌ها است. بر این اساس، نوسانات در تقاضای سفر و ظرفیت کمان‌های شبکه سبب می‌شود که زمان سفرهای تجربه‌شده در کمان‌های شبکه مقادیر ثابتی نباشند. به‌عبارتی دیگر، تغییر در تقاضای سفر از یک طرف و وقوع تصادفات ترافیکی، شرایط نامساعد جوی، میزان روشنایی راه (عوامل مؤثر در ظرفیت) از طرفی دیگر باعث می‌شود که زمان سفر یک مسیر در ساعات مختلف روز و روزهای مختلف سال ثابت نبوده و همواره در حال تغییر باشد.

قابلیت اطمینان^۱ زمان سفر به‌عنوان معیاری برای تعیین میزان تغییرپذیری^۲ زمان سفر تلقی می‌شود. به عبارتی شیواتر، هر چه میزان تغییرپذیری زمان سفر کمتر باشد، قابلیت اطمینان زمان سفر افزایش می‌یابد. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که این معیار نقش بسزایی در تصمیم‌گیری مسافران ایفا می‌نماید. این بدین معنی است که مسافران همواره سعی می‌کنند مسیر یا شیوه سفری را انتخاب کنند که زمان سفر آن دستخوش تغییرات کمی باشد [Khademi et al. 2016].

در سال‌های اخیر، قابلیت اطمینان زمان سفر به‌عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی عملکرد شبکه حمل‌ونقل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این راستا، برنامه دوم پژوهش‌های راهبردی راه^۳ ایالات متحده آمریکا، قابلیت اطمینان زمان سفر را یکی از شاخص‌های چهارگانه ارزیابی پروژه‌های افزایش ظرفیت راه برمی‌شمرد [Pu, 2011]. با توجه به اهمیت تغییرپذیری زمان سفر، دهه گذشته شاهد طیف وسیعی از پژوهش‌ها در این زمینه بوده است. به‌طور کلی مطالعات در زمینه قابلیت اطمینان زمان سفر را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول پژوهش‌ها، بر اساس داده‌های مشاهداتی سعی در تعیین میزان قابلیت اطمینان زمان سفر دارند. دسته دوم به بررسی و مدل‌سازی واکنش مسافران به تغییرپذیری زمان سفر می‌پردازند. در این مقاله با توجه به هدف پژوهش، تنها مطالعات مرتبط با دسته اول مرور می‌شوند.

تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس

احتمال زمان سفر دارای چولگی^{۲۰} به سمت راست است؛ بنابراین، شاخص انحراف معیار استاندارد زمان سفر به تنهایی قادر نیست که تمام جنبه‌های تغییرپذیری در زمان سفر را نشان دهد [van Lint, van Zuylen and Tu, 2008]. هیگاتانی و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر در شبکه آزادراهی هانشین^{۲۱} ژاپن پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که الگوی نوسانات شاخص‌های ضریب تغییرات و زمان حائل شبیه به هم است و این دو شاخص ارزیابی قابلیت اطمینان می‌توانند به‌جای هم بکار روند. همچنین بر اساس مشاهدات این پژوهش، وقوع تصادفات ترافیکی سهم بسزایی در تغییرپذیری در زمان سفر در بازه‌های زمانی غیر اوج دارد [Higatani et al. 2009]. مارچوک و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده به وسیله فناوری بلوتوث به تحلیل تغییرپذیری زمان سفر دو قطعه از یک مسیر آزادراهی پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه، میزان تغییرپذیری در زمان سفر در بازه زمانی اوج نسبت به غیر اوج بیشتر است [Martchouk, Mannering, and Bullock, 2010]. تیلاور و سوسیلواتی (۲۰۱۲) بر اساس داده‌های مشاهداتی از یک مسیر شریانی، تابع توزیع احتمال بور را برای بررسی قابلیت اطمینان روز-به-روز زمان سفر پیشنهاد دادند. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها، تابع توزیع احتمال بور می‌تواند چولگی در زمان سفر را در نظر بگیرد. همچنین، استخراج انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر از این تابع توزیع احتمال آسان است [Taylor and Susilawati, 2012]. از آنجایی که تمامی پژوهش‌های فوق به بررسی تغییرپذیری زمان سفر در شبکه آزادراهی پرداخته بودند، یازوسی و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه تغییرپذیری زمان سفر در شبکه خیابان‌های محلی شهری پرداختند. با توجه به اینکه تاکسی‌های شهر نیویورک مجهز به سیستم موقعیت‌نمای جهانی هستند، یازوسی و همکاران (۲۰۱۲) از داده‌های زمان سفر تاکسی‌های شهر نیویورک بهره بردند. پژوهش فوق نشان داده‌است که الگوی تغییرپذیری زمان سفر در خیابان‌های محلی شهری با آزادراهی متفاوت است [Yazici, Kamga and Mouskos, 2012].

آزادراهی پیشنهاد شده‌اند. در بخش دوم این پژوهش‌ها مرور می‌شوند.

اکثر پژوهش‌های پیشین به تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر در شبکه‌های آزادراهی پرداخته‌اند و پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه قابلیت اطمینان زمان سفر در سیستم اتوبوس‌رانی انجام شده است. علاوه بر این، اکثر این پژوهش‌های اندک با به‌کارگیری روش‌های آمار توصیفی^{۱۷}، تنها به توصیف داده‌های مشاهداتی پرداخته‌اند. در این پژوهش، علاوه بر بکارگیری روش‌های آمار توصیفی، سعی شده است تغییرات شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان سفر در بازه‌های زمانی مختلف روز بررسی شوند. همچنین، با استفاده از روش‌های موجود در آمار استنباطی^{۱۸} به تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهداتی زمان سفر پرداخته می‌شود. در نهایت، بر اساس داده‌های مشاهداتی زمان سفر، به بررسی نوع تابع توزیع احتمال زمان سفر پرداخته می‌شود. شایان‌ذکر است که داده‌های زمان سفر به‌کاررفته در این پژوهش، مربوط به بخشی مشترک از دو خط اتوبوس‌رانی شهر تهران هستند که توسط سامانه موقعیت‌یاب^{۱۹} اتوبوس‌های شرکت اتوبوس‌رانی شهر تهران ثبت شده‌اند.

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 اتوبوس می‌پردازد. در بخش پنجم، نتایج تحلیل‌های تغییرپذیری زمان سفر اتوبوس ارائه خواهند شد. در نهایت در بخش ششم، علاوه بر نتیجه‌گیری، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در دهه گذشته، پژوهش‌های مختلفی از داده‌های مشاهداتی زمان سفر برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر استفاده کرده‌اند. ون‌لینت و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های زمان سفر یک قطعه ۱۹ کیلومتری از یک آزادراه به بررسی انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تابع توزیع

پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که از میان توابع توزیع احتمال بکار رفته برای زمان سفر، تابع توزیع احتمال ویبول بدترین برازش و توابع توزیع احتمال بور و مدل گوسی ترکیبی^{۳۳} بهترین برازش را بر داده‌های زمان سفر دارند [Ma et al. 2016]

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این بخش از مقاله، ابتدا، آزمون‌های آماری مورد استفاده در این مطالعه تشریح می‌شوند. در ادامه، شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان سفر، تبیین و تشریح خواهند شد.

۳-۱ آزمون کلموگروف-اسمیرنوف

آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^{۳۴} یک آزمون آماری برای ارزیابی هم‌قواری^{۳۵} توزیع یک نمونه از داده‌ها با یک توزیع مشخص استفاده می‌شود. این آزمون بر اساس یک نمونه مشاهداتی از داده‌ها، فرضیه پیروی توزیع جامعه آن نمونه از یک توزیع احتمال مشخص را بررسی می‌نماید. در آزمون فوق، فرضیه صفر (H_0) و فرضیه مقابل (H_1) به صورت زیر هستند:

H_0 : داده‌های مشاهداتی از توزیعی مشخص (برای مثال، توزیع لگ‌نرمال) پیروی می‌کنند.

H_1 : داده‌های مشاهداتی از آن توزیع مشخص (برای مثال، توزیع لگ‌نرمال) پیروی نمی‌کنند.

آماره آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برابر با بزرگ‌ترین قدرمطلق تفاضل بین تابع توزیع احتمال تجمعی تجربی^{۳۶} $\hat{F}_n(x)$ و تابع توزیع احتمال مورد ادعا $F(x)$ است. به طوری که

$$D_n = \sup_x |\hat{F}_n(x) - F(x)| \quad (1)$$

در رابطه فوق، برای مجموعه داده‌های مشاهداتی $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ، تابع توزیع احتمال تجمعی تجربی به صورت

$$\hat{F}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I\{x_i \leq x\} \quad (2)$$

تعریف می‌شود. در رابطه (۲)، $I\{\cdot\}$ تابعی است که مقدار آن در صورت درستی گزاره $\{x_i \leq x\}$ برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با ۰ است.

به منظور در نظر گرفتن ماهیت احتمالی زمان سفر در مدل‌سازی‌های حمل‌ونقلی، تعیین نوع و پارامترهای تابع توزیع احتمال زمان سفر یک مسیر یا کمان از شبکه ضروری است. در این راستا، بر اساس داده‌های مشاهداتی زمان سفر، توابع توزیع احتمال گوناگونی برای زمان سفر ارائه شده است. برای مثال، پُلِس (۱۹۷۹) و آلدیک و امان (۲۰۰۶) به ترتیب، توابع توزیع احتمال گاما و ویبول را پیشنهاد کردند [Al-Deek and Emam, 2006, Polus, 1979]. ونلینت و همکاران (۲۰۰۸) تابع توزیع احتمال لگ-نرمال را پیشنهاد کردند [van Lint, van Zuylen, and Tu, 2008]. تیلور و سوسیلاواتی (۲۰۱۲) و سوسیلاواتی و همکاران (۲۰۱۲)، تابع توزیع احتمال بور را بر داده‌های زمان سفر برازش دادند [Susilawati, Taylor and Somenahalli, 2013, Taylor and Susilawati, 2012]. همچنین، آرزومندی و بهام (۲۰۱۱) نشان دادند که دو توزیع لگ-نرمال و لگ-لوجستیک، توزیع احتمال داده‌های زمان سفر را با دقت بیشتری تخمین می‌زنند [Arezoumandi and Bham, 2011].

قابلیت اطمینان زمان سفر در شبکه اتوبوس‌رانی تأثیر بسزایی بر سطح کیفیت خدمات سیستم اتوبوس‌رانی می‌گذارد. در حقیقت، هر چه میزان تغییرپذیری زمان سفر در شبکه اتوبوس‌رانی کمتر باشد، مطلوبیت این سیستم بیشتر خواهد بود. با وجود اهمیت تغییرپذیری زمان سفر در کیفیت خدمات سیستم اتوبوس‌رانی، پژوهش‌های بسیار اندکی در این زمینه انجام شده است. همکاران (۲۰۰۹)، نبود داده‌های زمان سفر اتوبوس را یکی از مهم‌ترین دلایل این امر دانسته‌اند. در این راستا، آن‌ها با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی، به بررسی شکل تابع توزیع احتمال زمان سفر یک مسیر اتوبوس‌رانی در شهر ملبورن استرالیا پرداختند. در پژوهش فوق، آن‌ها کاربری زمین، تعداد تقاطع‌ها، تعداد ایستگاه‌های اتوبوس، طول مسیر را مهم‌ترین عوامل مؤثر در تغییرپذیری زمان سفر اتوبوس بیان کردند [Mazloumi, Currie and Rose, 2009]. در پژوهشی دیگر، ما و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی شکل تابع توزیع احتمال زمان سفر در دو خط اتوبوس‌رانی شهر بریسن^{۳۷} استرالیا

۳-۳ آزمون لون

آزمون لون^{۲۹} برای بررسی تساوی واریانس‌های دو یا بیش از دو گروه قابل استفاده است. در این آزمون، فرضیه صفر و مقابل به صورت

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_k^2 \quad \text{for at least one pair } (i, k)$$
(۷)

تعریف می‌شوند که در آن σ_i^2 بیانگر واریانس گروه i ام است. اگر بر اساس داده‌های مشاهداتی فرضیه صفر رد شود، آنگاه واریانس گروه‌ها به‌طور معناداری با یکدیگر متفاوت هستند [Montgomery, Runger and Hubele, 2010]. آماره آزمون لون به صورت

$$W = \frac{(N - a) \sum_{i=1}^a n_i (\bar{Z}_{i.} - \bar{Z}_{..})^2}{a - 1 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_{i.})^2}$$
(۸)

تعریف می‌شود [Lim and Loh, 1996]. در رابطه فوق، $\bar{Z}_{i.}$ و $\bar{Z}_{..}$ برابرند با

$$\bar{Z}_{i.} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}$$
(۹)

$$\bar{Z}_{..} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}$$
(۱۰)

که در آن Z_{ij} برابر است با

$$Z_{ij} = |y_j^i - \bar{y}_i|$$
(۱۱)

در رابطه فوق، \bar{y}_i میانگین داده‌های مشاهداتی (y_j^i) در گروه i ام است.

۳-۴ شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان سفر

در پژوهش‌های پیشین، چندین شاخص برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان زمان سفر ارائه شده است. این شاخص‌ها در حقیقت بیانگر میزان قابلیت اطمینان زمان سفر از منظرهای مختلف هستند. در این پژوهش، شاخص‌های «انحراف معیار استاندارد»، «ضریب تغییرات»، «چولگی»، «زمان حائل» و «زمان برنامه‌ریزی» تبیین و تشریح می‌شوند.

۲-۳ آزمون کروسکال-والیس

آزمون کروسکال-والیس^{۳۰} معادل ناپارامتری آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) است. این آزمون برای مقایسه میانگین‌های چندین گروه استفاده می‌شود و تعمیم‌یافته آزمون ویلکاکسون^{۳۱} است [Montgomery, Runger, and Hubele, 2010]. دلیل به‌کارگیری آزمون کروسکال-والیس به‌جای آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه این است که داده‌های زمان سفر اغلب از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند.

فرض کنید مجموعه داده‌های مشاهداتی در گروه (نمونه) i ام باشد و n_i بیانگر تعداد داده‌های مشاهداتی در این گروه باشد. همچنین فرض کنید که a گروه داده (نمونه) مشاهداتی جمع‌آوری شده است. فرضیه صفر و مقابل در آزمون کروسکال-والیس به صورت

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_k \quad \text{for at least one pair } (i, k)$$
(۳)

است که در آن μ_i بیانگر میانگین گروه i ام است.

در آزمون کروسکال-والیس، ابتدا، داده‌های مربوط به همه گروه‌ها به‌صورت یک مجموعه در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه تمامی داده‌ها از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند و به هر داده، یک رتبه از یک تا N ($N = \sum_{i=1}^a n_i$) اختصاص داده می‌شود. آماره آزمون کروسکال-والیس به صورت

$$H = \frac{1}{S^2} \left[\sum_{i=1}^a \frac{R_i^2}{n_i} - \frac{N(N+1)^2}{4} \right]$$
(۴)

تعریف می‌شود. در رابطه فوق، R_i ، مجموع رتبه داده‌ها (R_{ij}) در گروه i ام است؛ به طوری که

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij}$$
(۵)

همچنین، S^2 به صورت

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij}^2 - \frac{N(N+1)^2}{4} \right]$$
(۶)

محاسبه می‌شود.

حالات به موقع به مقصد خود برسد. این شاخص به صورت زیر تعریف می شود [Pu, 2011]:

$$BI = \frac{T_{90} - \bar{t}}{\bar{t}} \quad (14)$$

زمان برنامه ریزی را اغلب برابر با صدک ۹۰ ام تابع توزیع زمان سفر در نظر می گیرند. بر این اساس، شاخص زمان برنامه ریزی به صورت نسبت زمان برنامه ریزی به زمان سفر جریان آزاد تعریف می شود. در پژوهش های پیشین، زمان سفر جریان آزاد را برابر با صدک ۱۵ ام تابع توزیع زمان سفر در نظر گرفته اند [Pu, 2011]. بنابراین، شاخص زمان برنامه ریزی برابر است با

$$PI = \frac{T_{90}}{t_{freeflow}} = \frac{T_{90}}{T_{15}} \quad (15)$$

۳-۵ توزیع های ترکیبی

توزیع های ترکیبی^۳، توزیع های آماری هستند که از ترکیب محذب چندین توزیع آماری ایجاد شده اند. فرض کنید، $p_1(x), \dots, p_K(x)$ توابع چگالی احتمال متناظر با K توزیع آماری باشند. تابع چگالی احتمال یک توزیع آماری ترکیبی به صورت

$$f(x) = \sum_{k=1}^K w_k p_k(x) \quad (16)$$

تعریف می شود. در رابطه بالا، w_k ها مقادیر مثبت وزنی هستند که مجموع آنها برابر با ۱ است. به عبارتی

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1. \quad (17)$$

بر اساس روابط فوق می توان نتیجه گرفت که یک توزیع غیر ترکیبی مانند توزیع «نرمال» یک حالت خاصی از یک توزیع ترکیبی است که در آن K برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

در مطالعات پیشین، میزان نیکویی برازش توزیع ترکیبی گوسی بر داده ها زمان سفر بررسی شده است. در این پژوهش، میزان نیکویی برازش توزیع های ترکیبی گوسی و لگ نرمال بر داده های زمان سفر بررسی می شود. شایان ذکر است که توزیع های ترکیبی گوسی و لگ نرمال به ترتیب از ترکیب محذب چندین توزیع نرمال و لگ نرمال ساخته می شوند.

انحراف معیار استاندارد یکی از مهم ترین شاخص هایی است که در تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر بکار می رود. این شاخص، در حقیقت، آماره ای است که بیانگر میزان انحراف از میانگین است. هرچه انحراف معیار زمان سفر یک مسیر بیشتر باشد، میزان تغییر پذیری آن مسیر بیشتر و به تبع آن، میزان قابلیت اطمینان زمان سفر آن مسیر کمتر خواهد بود. انحراف معیار زمان سفر یک مسیر در بازه های زمانی مختلف روز و روزهای مختلف سال می تواند تغییر کند. برای بررسی فرضیه برابری انحراف معیار زمان سفر در بازه های زمانی مختلف روز یا روزهای هفته می توان از آزمون لون استفاده کرد.

ضریب تغییرات شاخص دیگری است که در تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر بکار می رود. این شاخص میزان پراکندگی یک تابع توزیع احتمال را نشان می دهد. ضریب تغییرات زمان سفر یک مسیر به صورت

$$CV_t = \frac{S_t}{\bar{t}} \quad (12)$$

محاسبه می شود که در آن \bar{t} بیانگر میانگین زمان سفر و S_t انحراف معیار استاندارد زمان سفر است.

یکی دیگر از شاخص های مهم در تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر، شاخص چولگی است. کم و اسمال (۲۰۰۱)، اختلاف بین صدک ۹۰ ام و صدک ۱۰ ام ($T_{90} - T_{10}$) را به عنوان یک شاخص برای میزان تغییر پذیری زمان سفر یک مسیر ارائه دادند [Lam and Small, 2001]. ون لینت و همکاران (۲۰۰۸)، با الهام گرفتن از پژوهش کم و اسمال (۲۰۰۱)، شاخصی به نام چولگی پیشنهاد دادند که به صورت زیر تعیین می شود [Lint, van Zuylen and Tu, 2008]:

$$\lambda^{skew} = \frac{T_{90} - T_{50}}{T_{50} - T_{10}}, \quad T_{10} < T_{50} < T_{90}. \quad (13)$$

در رابطه فوق، T_{10} ، T_{50} و T_{90} به ترتیب صدک ۱۰ ام، میانه و صدک ۹۰ ام داده های مشاهداتی زمان سفر هستند.

از دیگر شاخص های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر، شاخص زمان حائل است. این شاخص بیانگر درصد زمان اضافه ای (نسبت به میانگین زمان سفر یک مسیر) است که یک مسافر باید زودتر مبدأ خود را ترک نماید تا در ۹۰ درصد

خطوط ۸۸۰۳ و ۳۰۱۱ در مجموع دارای ۴۳ دستگاه اتوبوس هستند. دستگاه‌های موقعیت‌یاب نصب‌شده بر روی اتوبوس‌های این خطوط، موقعیت اتوبوس‌ها را هر دو دقیقه یک‌بار به یک پایگاه داده ارسال می‌کنند. علاوه بر این، در هنگام باز شدن و بسته شدن درب عقب اتوبوس در ایستگاه‌های اتوبوس، موقعیت اتوبوس مجدداً ارسال می‌شود.

نقاط نشان داده‌شده در شکل ۲ بیانگر مکان‌هایی هستند که موقعیت اتوبوس در آن مکان‌ها توسط سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس در بازه زمانی مورد مطالعه ثبت شده است. به دلیل خطای سامانه موقعیت‌یاب، موقعیت اتوبوس‌ها دقیقاً بر روی خیابان شهید مطهری تصویر نمی‌شوند. دلیل این مسئله، خطای سامانه موقعیت‌یابی است. در این مطالعه، برای انطباق داده‌های سامانه موقعیت‌یاب بر روی شبکه راه از روش ارائه‌شده در مطالعه یوان و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شده است [Yuan et al. 2010]. داده‌های دریافتی از سامانه موقعیت‌یاب، دقتی در حدود ۱۰ متر دارند. چنین دقتی برای بازسازی حرکت اتوبوس‌ها مناسب به نظر می‌رسد. با استفاده از اطلاعات موقعیت و شماره شناسایی هر اتوبوس، خط سیر اتوبوس‌ها بازسازی شده است. با بازسازی خط سیر اتوبوس‌های عبوری از کمان‌های مورد مطالعه، می‌توان زمان سفر بین ابتدای کمان اول تا انتهای کمان سوم را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که در این مقاله، تنها از داده‌های روزهای کاری هفته برای تحلیل‌های زمان سفر استفاده شده است و مجموعه زمان سفرهای روزهای پنجشنبه و جمعه از مجموعه داده‌ها حذف شده است.

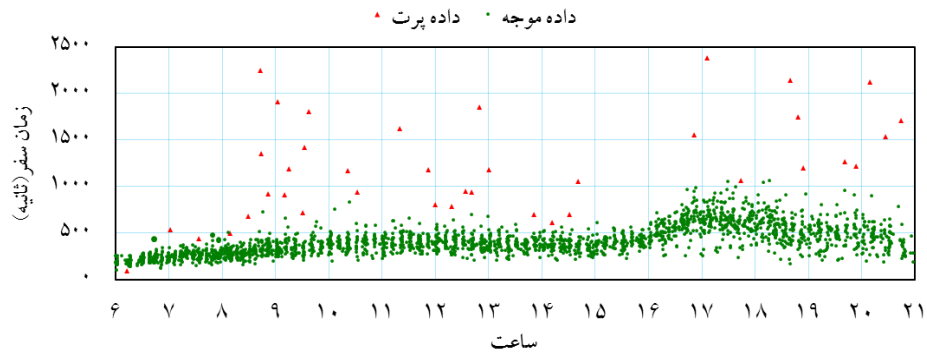
۴. توصیف منطقه مورد مطالعه و روش جمع‌آوری

داده‌ها

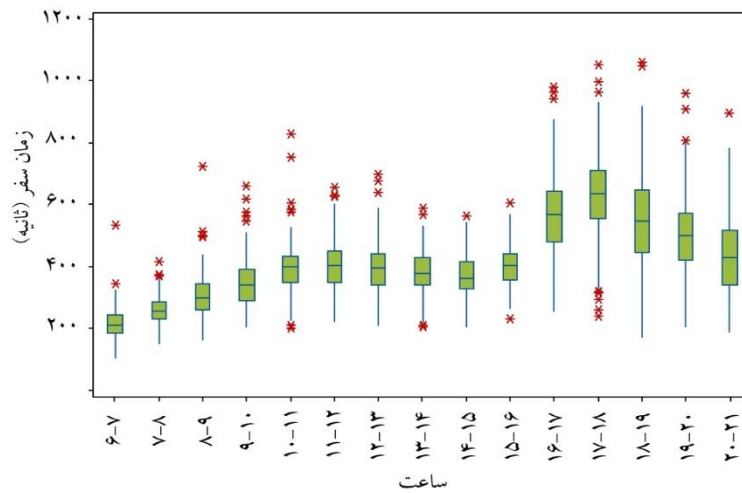
داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش مربوط به اطلاعات سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس‌های خطوط ۸۸۰۳ و ۳۰۱۱ شرکت واحد اتوبوس‌رانی تهران است. سامانه موقعیت‌یاب اتوبوس‌های شهری از گیرنده‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی، برای موقعیت‌یابی استفاده می‌کند. داده‌های استفاده‌شده در این مقاله مربوط به بازه زمانی ۱۵ آبان ۱۳۹۳ تا ۱۵ آذر ۱۳۹۳ است. خط ۸۸۰۳ مربوط به مسیر خیابان مطهری به میدان رسالت و خط ۳۰۱۱ مربوط به مسیر بیمارستان امام خمینی به پایانه شهید بهشتی است. در این مطالعه از داده‌های زمان سفر سه کمان مشترک این دو خط استفاده شده است. کمان‌های مورد مطالعه، متعلق به خیابان شهید مطهری هستند و به ترتیب بین تقاطع‌های زیر قرار دارند:

- ۱- کمان اول: تقاطع خیابان شهید مطهری با خیابان‌های میرزای شیرازی و قائم‌مقام فراهانی،
 - ۲- کمان دوم: تقاطع خیابان شهید مطهری با خیابان‌های قائم‌مقام فراهانی و شهید دکتر مفتح،
 - ۳- کمان سوم: تقاطع خیابان شهید مطهری با خیابان‌های شهید دکتر مفتح و شهید سلیمان خاطر.
- طول کمان اول ۲۷۸ متر، کمان دوم ۷۶۰ متر و طول کمان سوم ۳۱۲ متر است. بنابراین طول مسیر اتوبوس مورد مطالعه ۱۳۵۰ متر است. شکل ۱، محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این شکل، تقاطع‌ها با دایره‌های قرمز و ایستگاه‌های اتوبوس با دایره‌های سبز مشخص شده‌اند.

تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس



شکل ۳. داده‌های زمان سفر اتوبوس در بازه زمانی ۶ صبح تا ۲۱ شب



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای زمان سفر در ساعات مختلف روز

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، شاخص ضریب چولگی بیانگر نسبت $T_{90} - T_{50}$ به $T_{50} - T_{10}$ است. از دیدگاه مسافر $T_{90} - T_{50}$ به‌نوعی بیانگر میزان تأخیر غیرقابل‌انتظار و $T_{50} - T_{10}$ بیانگر مقدار زود رسیدن غیرقابل‌انتظار است. بر این اساس، هرچه میزان شاخص چولگی زمان سفر یک مسیر بیشتر باشد، مقدار تأخیرهای غیرقابل‌انتظار از مقدار زود رسیدن غیرقابل‌انتظار بیشتر خواهد بود.

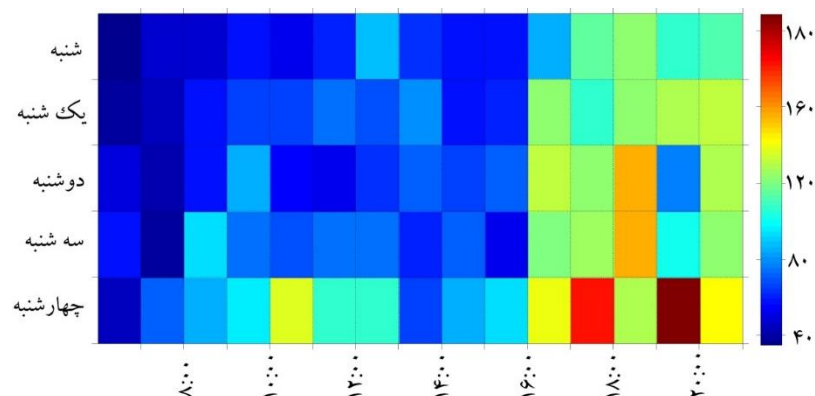
شکل ۷، نشان‌دهنده تغییرات ضریب چولگی زمان سفر اتوبوس در ساعات مختلف روزهای کاری هفته است. بر اساس این شکل، میزان ضریب چولگی در دوره زمانی اوج صبح بیشتر از دوره زمانی اوج عصر است. همچنین بر اساس این شکل، روز چهارشنبه، بیشترین تغییرپذیری زمان سفر را بر اساس این شاخص به خود اختصاص داده است.

همچنین شکل ۵، انحراف معیار استاندارد زمان سفر مسیر اتوبوس را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که انحراف معیار زمان سفر مسیر اتوبوس در بازه زمانی اوج عصر بیشتر است. همچنین بر اساس این شکل، زمان سفر در روزهای چهارشنبه، تغییرپذیری بیشتری دارد.

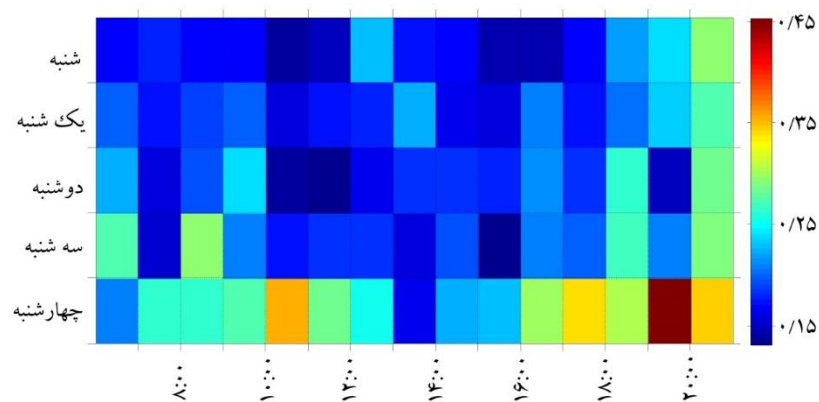
شکل ۶، تغییرات شاخص «ضریب تغییرات زمان سفر» را در ساعات مختلف روزهای کاری هفته نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، میزان ضریب تغییرات زمان سفر در اکثر ساعات روزهای کاری هفته بین ۰/۱۵ تا ۰/۳ است. شایان ذکر است که در صورتی که بخواهیم قابلیت اطمینان زمان سفر را در طراحی و زمان‌بندی سامانه‌های همگانی و شبه همگانی دخیل کنیم، آگاهی از بازه تغییرات «ضریب تغییرات زمان سفر» می‌تواند مفید و راهگشا باشد.

شکل ۹. بیانگر تغییرات شاخص زمان برنامه‌ریزی در ساعات مختلف روزهای کاری هفته است. بر اساس این شکل، تغییرپذیری زمان سفر در دوره اوج عصر بیشتر از دوره اوج صبح است. همچنین، میزان شاخص زمان برنامه‌ریزی در روزهای سه‌شنبه و به‌خصوص چهارشنبه بیشتر از سایر روزها است.

شکل ۸. بیانگر تغییرات شاخص زمان حائل در بازه‌های زمانی مختلف روزهای کاری هفته است. بر اساس این شکل، میزان شاخص زمان حائل در دوره زمانی اوج عصر بیشتر از اوج صبح است. به این معنا که مسافران در این بازه‌های زمانی، تأخیرهای غیرقابل‌انتظار طولانی‌تری را تجربه می‌کنند. همچنین بر اساس این شکل، میزان تجربه تأخیرهای طولانی در روزهای دوشنبه، سه‌شنبه و چهارشنبه بیشتر از روزهای شنبه و یک‌شنبه است.

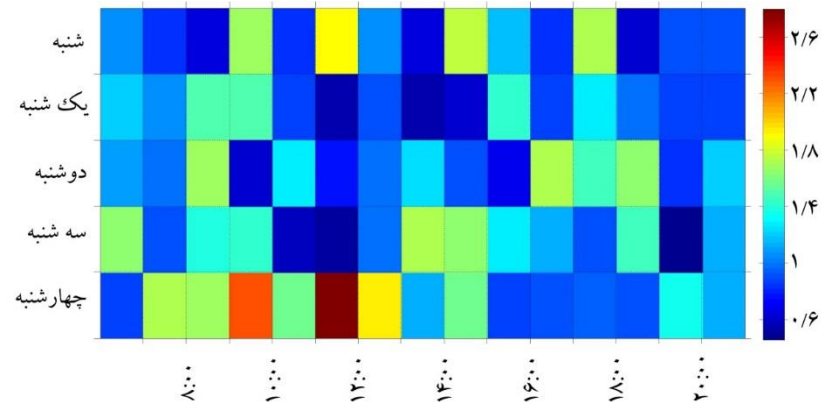


شکل ۵. انحراف معیار استاندارد زمان سفر مسیر اتوبوس در ساعات مختلف روزهای کاری هفته

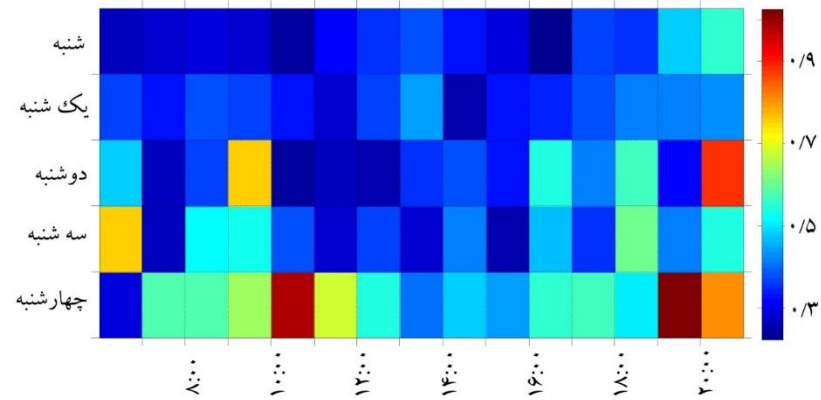


شکل ۶. ضریب تغییرات زمان سفر مسیر اتوبوس در ساعات مختلف روزهای کاری هفته

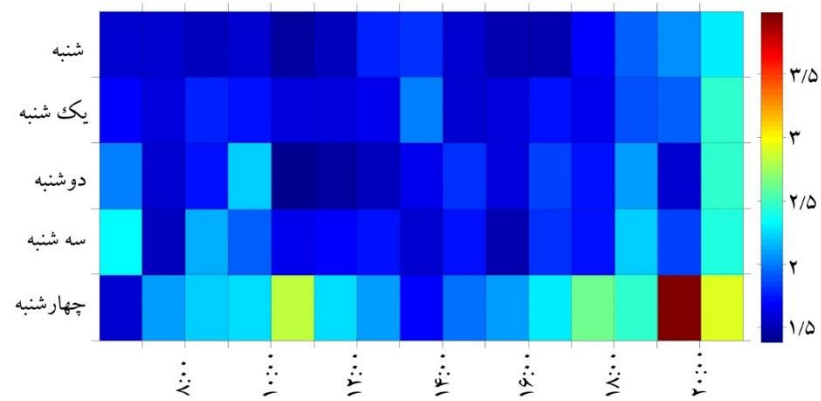
تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس



شکل ۷. ضریب چولگی زمان سفر مسیر اتوبوس در ساعات مختلف روزهای کاری هفته



شکل ۸. شاخص زمان حائل در ساعات مختلف روزهای کاری هفته



شکل ۹. شاخص زمان برنامه‌ریزی در ساعات مختلف روزهای کاری هفته

شکل ۱۰، میزان همبستگی بین شاخص‌های میانگین زمان سفر (\bar{t})، انحراف معیار استاندارد زمان سفر (S_t)، ضریب تغییرات زمان سفر (Cv_t)، ضریب چولگی (\mathcal{R}^{skew})، زمان حائل (BI) و زمان برنامه‌ریزی (PI) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اکثر شاخص‌های قابلیت اطمینان

زمان سفر همبسته هستند. اما، میزان همبستگی بین شاخص چولگی و سایر شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر کم است. به این معنا که بین شاخص چولگی و سایر شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر رابطه خطی وجود ندارد. به بیانی دیگر، افزایش یا کاهش سایر شاخص‌های قابلیت اطمینان زمان سفر صرفاً منجر

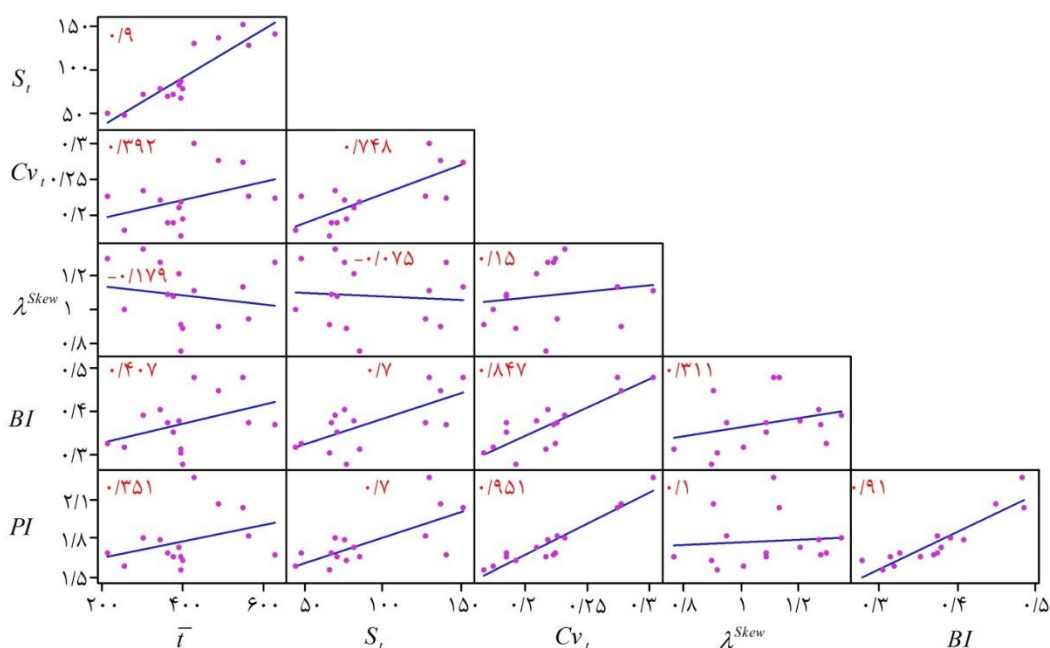
اما با توجه به نتایج این پژوهش، توزیع زمان سفر دارای چولگی است. بر این اساس، فرض نرمال بودن زمان سفر در پژوهش‌هایی از این قبیل می‌تواند مورد تردید قرار گیرد.

در این پژوهش برای بررسی شکل تابع توزیع احتمال زمان سفر اتوبوس در ساعات مختلف روز، ابتدا با استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی، پارامترهای توزیع‌های احتمال «نرمال»، «گ-نرمال»، «گاما»، «ویبول»، «گ-لوجستیک» و «بور» برای هر یک از ساعات مختلف روز تخمین زده شدند. در ادامه برای ارزیابی میزان هم‌قواری توزیع‌های تخمین زده شده با توزیع احتمال تجربی داده‌های زمان سفر از آزمون ناپارامتری کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شد.

به افزایش یا کاهش شاخص چولگی نمی‌شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با در اختیار داشتن چگونگی تغییرات سایر شاخص‌ها نمی‌توان درباره چگونگی تغییر شاخص چولگی اظهار نظر کرد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در تحلیل‌های قابلیت اطمینان زمان سفر، شاخص چولگی همواره بررسی شود.

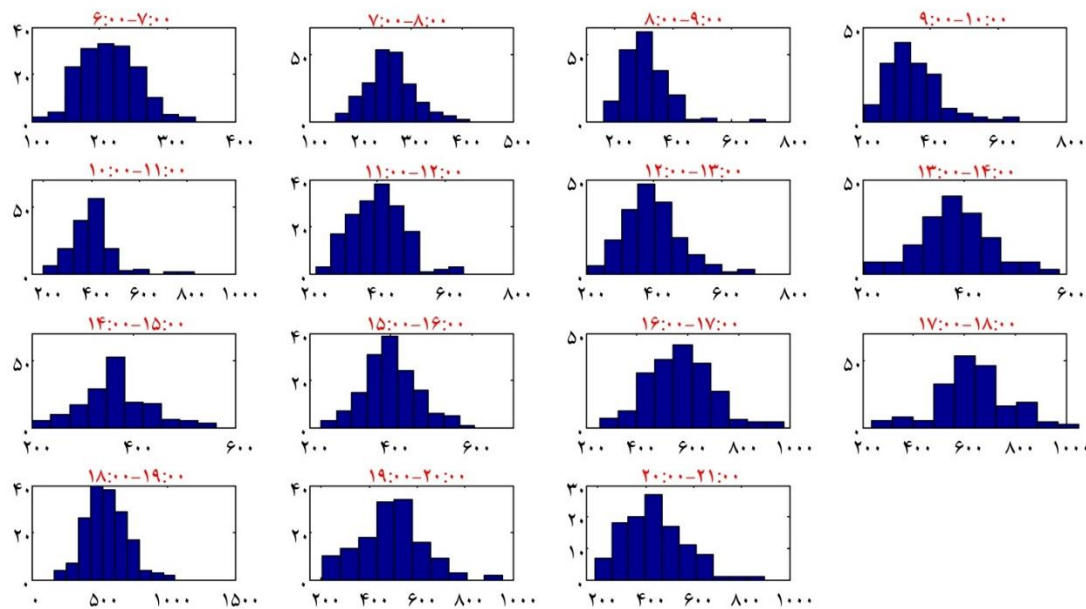
شکل ۱۱، توزیع‌های فراوانی داده‌های زمان سفر در ساعات مختلف روز را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، توزیع‌های زمان سفر در اغلب ساعات‌های روز تقریباً نامتقارن هستند و به سمت راست چولگی دارند.

در برخی از پژوهش‌های پیشین در زمینه طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی، تابع توزیع احتمال زمان سفر به صورت نرمال (مقارن) فرض شده است [Fu, 2002, Yao et al., 2014].



شکل ۱۰. میزان همبستگی بین شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر

تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس



شکل ۱۱. توزیع‌های فراوانی داده‌های زمان سفر در ساعات مختلف روز

بر اساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد توزیع‌های دخیل در ساخت توزیع ترکیبی، میزان نیکویی برازش توزیع آماری ترکیبی بر داده‌های مشاهداتی زمان سفر بیشتر می‌شود. اما، روند افزایشی میزان «لگاریتم درست‌نمایی» با افزایش K کاهش می‌یابد. برای مثال، هنگامی که K بزرگ‌تر از ۲ شود، میزان «لگاریتم درست‌نمایی» برای توزیع ترکیبی لگ‌نرمال همگرا می‌شود. همچنین، بر اساس شکل ۱۴، توزیع‌های ترکیبی لگ‌نرمال نسبت به ترکیبی گوسی برازش بهتری بر داده‌های مشاهداتی زمان سفر دارند.

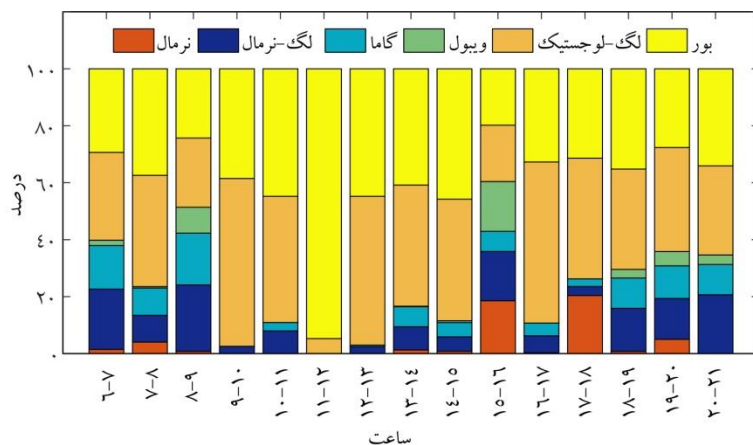
افزایش تعداد توزیع‌های دخیل در ساخت یک توزیع ترکیبی موجب پیچیده‌تر شدن مدل می‌شود. در ادبیات پیشین، برای انتخاب بهترین مدل از «معیار اطلاعات آکائیک»^{۳۳} (AIC) استفاده شده‌است. این معیار، نیکویی برازش و پیچیدگی مدل را همزمان در انتخاب مدل برتر در نظر می‌گیرد. بر اساس این معیار، مدلی که دارای کمترین مقدار AIC باشد، بهترین مدل است. شکل ۱۵. میزان «معیار اطلاعات آکائیک» برای توزیع‌های ترکیبی گوسی و ترکیبی لگ‌نرمال به ازای مقادیر مختلف K را نشان می‌دهد. بر

شکل ۱۲، بیانگر میزان نسبی آماره p -value آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای توابع توزیع احتمال اشاره‌شده در ساعات مختلف روز است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، توابع توزیع احتمال «بور»، «لگ-لوجستیک» و «لگ-نرمال» بهترین برازش را بر داده‌های مشاهداتی زمان سفر اتوبوس دارند. شکل ۱۳، میزان برازش سه توزیع احتمال فوق بر داده‌های مشاهداتی زمان سفر برای بازه زمانی ۸ تا ۹ صبح را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج برازش داده‌ها زمان سفر می‌توان نتیجه گرفت که در سطح معنی‌داری ۵ درصد نمی‌توان فرض تبعیت داده‌های زمان سفر از سه تابع توزیع احتمال فوق را رد کرد.

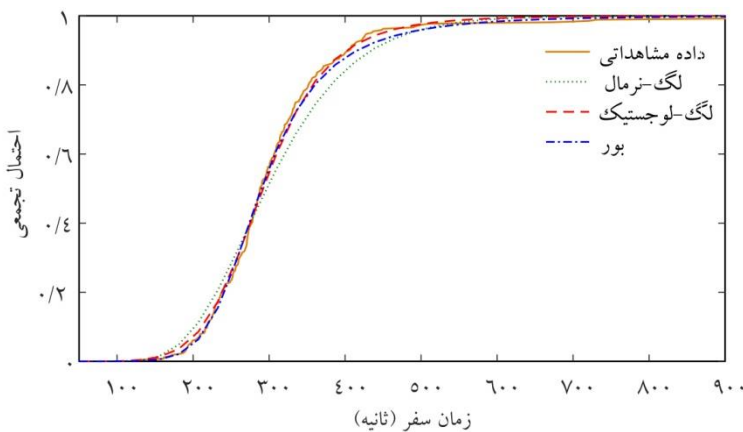
شکل ۱۴ میزان نیکویی برازش توزیع‌های ترکیبی گوسی و ترکیبی لگ‌نرمال بر داده‌های زمان سفر ساعت ۸ تا ۹ صبح به ازای مقادیر مختلف K (تعداد توزیع‌های دخیل در ساخت توزیع ترکیبی) را نشان می‌دهد. در این شکل از «لگاریتم درست‌نمایی»^{۳۳} به عنوان شاخص نیکویی برازش استفاده شده‌است. هر چه مقدار «لگاریتم درست‌نمایی» برای یک مدل تخمین زده‌شده بیشتر باشد، میزان نیکویی برازش آن مدل بر داده‌های مشاهداتی بیشتر است.

که توزیع‌های ترکیبی گوسی و ترکیبی لگ‌نرمال ($K > 1$) نسبت به توزیع‌های ساده نرمال و لگ‌نرمال ($K=1$) با دقت بیشتری توزیع احتمال زمان سفر را تقریب می‌زنند. بر این اساس، بررسی نیکویی برازش توزیع‌های ترکیبی بر داده‌های زمان سفر ضروری به نظر می‌رسد.

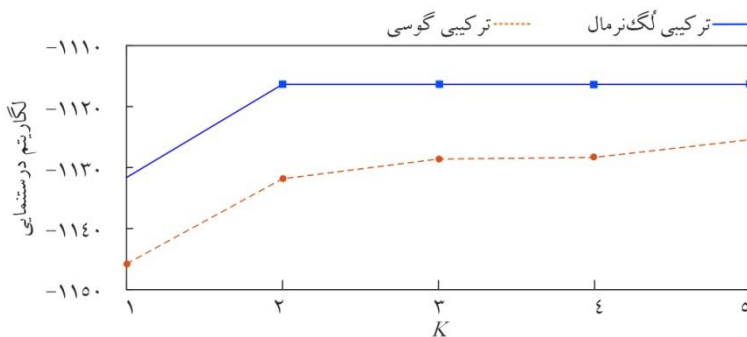
اساس این معیار، توزیع ترکیبی لگ‌نرمال متشکل از دو توزیع آماری ($K=2$) نسبت به سایر توزیع‌ها مناسب‌تر است. در پژوهش‌های پیشین، به استفاده از توزیع‌های ترکیبی برای تخمین توزیع احتمال داده‌های زمان سفر بسیار کم توجه شده‌است. اما، با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۱۲. میزان نسبی آماره p -value آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در ساعات مختلف روز

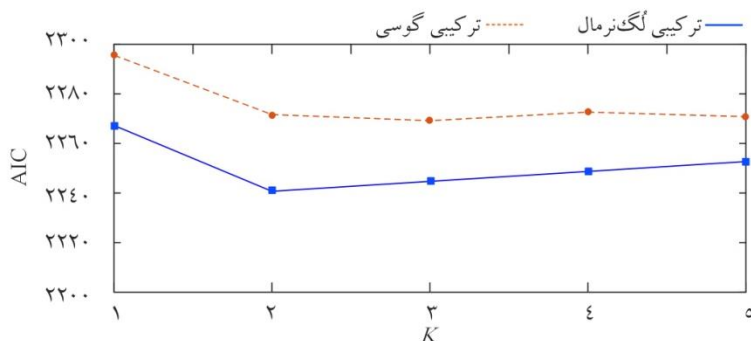


شکل ۱۳. تابع توزیع تجمعی احتمال داده‌های مشاهده‌ای زمان سفر و توابع توزیع احتمال برازش شده برای ساعت ۸ تا ۹ صبح



شکل ۱۴. «لگاریتم درستنمایی» به ازای مقادیر مختلف K

تحلیل قابلیت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس



شکل ۱۵. «معیار اطلاعات آکائیک» به ازای مقادیر مختلف K

۶. نتیجه گیری

با توجه به تأثیر بسزای قابلیت اطمینان زمان سفر بر کارایی خطوط اتوبوس رانی، در این مقاله به تحلیل انواع شاخص های قابلیت اطمینان زمان سفر در خطوط اتوبوس پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر، ارزیابی های یکسانی از قابلیت اطمینان زمان سفر در یک خطوط اتوبوس ارائه نمی دهند. علاوه بر این، نتایج آزمون های آماری کروسکال-والیس و لون نشان داد که تفاوت معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بین میانگین ها و انحراف معیارهای زمان سفر در ساعات مختلف روز وجود دارد. این نکته به نوعی بیانگر ماهیت احتمالی و دینامیک زمان سفر در یک خطوط اتوبوس است. بر این اساس، در نظر گرفتن ماهیت احتمالی و دینامیک زمان سفر در طراحی و زمان بندی خطوط اتوبوس می تواند نقش بسزایی در کارایی و عملکرد به موقع آن داشته باشد. در این پژوهش، میزان همبستگی بین شاخص های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر نیز بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان همبستگی بین شاخص چولگی و سایر شاخص های قابلیت اطمینان زمان سفر کم است. این بدین معنی است که با در اختیار داشتن چگونگی تغییرات سایر شاخص ها نمی توان درباره چگونگی تغییر شاخص چولگی اظهار نظر کرد. بنابراین پیشنهاد می شود که در تحلیل های قابلیت اطمینان زمان سفر، شاخص چولگی همواره بررسی شود.

همچنین، با توجه به اینکه تعیین نوع تابع توزیع زمان سفر یکی از ملزومات برای در نظر گرفتن ماهیت احتمالی زمان سفر در ارزیابی ها و طراحی شبکه حمل و نقل همگانی است، در این مطالعه به بررسی نوع تابع توزیع زمان سفر پرداخته شد. بر اساس داده های زمان سفر می توان نتیجه گرفت که توزیع زمان سفر در ساعات مختلف روز یکسان نیست. علاوه بر این، بر اساس نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، توابع توزیع احتمال «بور»، «لگ-لوجستیک» و «لگ-نرمال» بهترین برازش را بر داده های مشاهده ای زمان سفر اتوبوس دارند. همچنین، در این پژوهش نشان داده شد که بکارگیری توزیع های ترکیبی می تواند موجب شود تا توزیع داده های زمان سفر با دقت بیشتری تقریب زده شوند.

با توجه به اینکه تحلیل های این پژوهش بر اساس داده های زمان سفر یک ماهه دو خط از شبکه اتوبوس رانی شهر تهران است، بنابراین تعمیم نتایج این مطالعه به شبکه اتوبوس رانی شهر تهران منطقی به نظر نمی رسد. بر این اساس، دسترسی نداشتن به داده های زمان سفر تعداد زیادی خط اتوبوس به عنوان یک محدودیت در این مطالعه می تواند تلقی شود.

برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود که تغییرات شاخص های مختلف قابلیت اطمینان زمان سفر به تفکیک نوع خط اتوبوس (تندرو، مختلط با جریان ترافیک و غیره) در مقیاس وسیع تری انجام شود. همچنین، ارائه شاخصی به طور خاص برای ارزیابی قابلیت اطمینان زمان سفر در خطوط اتوبوس رانی می تواند مفید باشد. در نهایت، بررسی چگونگی تأثیرگذاری انواع شاخص های قابلیت اطمینان زمان سفر بر نحوه انتخاب مد و مسیر

مسافران نیز می‌تواند به‌عنوان یک افق پژوهشی شایان توجه تلقی شود.

۷. پی‌نوشت‌ها

- | | |
|--|--|
| ۱۷. Descriptive statistics | ۱. Reliability |
| ۱۸. Inferential statistics | ۲. Variability |
| ۱۹. Global positioning system | 3. Second Strategic Highway Research Program |
| ۲۰. Skewness | ۴. Vehicle-to-vehicle |
| ۲۱. Hanshin | ۵. Period-to-period |
| ۲۲. Brisbane | ۶. Day-to-day |
| ۲۳. Gaussian Mixture | ۷. Standard deviation |
| ۲۴. Kolmogorov–Smirnov test | ۸. Coefficient of variation index |
| ۲۵. Goodness-of-fit test | ۹. Buffer time index |
| ۲۶. Empirical cumulative distribution function | ۱۰. Skew index |
| ۲۷. Kruskal–Wallis test | ۱۱. Planning time index |
| ۲۸. Wilcoxon test | ۱۲. Log-normal distribution |
| ۲۹. Levene's test | ۱۳. Weibull distribution |
| 30. Mixture probability distributions | ۱۴. Burr distribution |
| ۳۱. Outlier | ۱۵. Gamma distribution |
| 32. Loglikelihood | ۱۶. Log-logistic distribution |
| 33. Akaike's information criterion | |

۸. مراجع

- Clark, Stephen D, Grant-Muller, Susan and Chen, Haibo. (2002) "Cleaning of matched license plate data", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1804, No.1, pp.1-7.
- Fu, Liping (2002) "Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 36, No.6, pp.485-506.
- Higatani, Akito, Kitazawa, Toshihiko, Tanabe, Jun, Suga, Yoshiki, Sekhar, Ravi, and Asakura, ۳۱۰ مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۷
- Al-Deek, Haitham and Emam, B. (2006) "New methodology for estimating reliability in transportation networks with degraded link capacities", Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No.3, pp.117-129.
- Arezoumandi, M. and Bham, GH. (2011) "Travel time reliability estimation: Use of median travel time as measure of central tendency", First Congress of Transportation and Development Institute (TDI), Chicago, United States.

- Montgomery, Douglas C., Runger, George C. and Hubele, Norma F. (2010) "Engineering statistics", 5th edition , John Wiley & Sons.
- Polus, Abishai (1979) "A study of travel time and reliability on arterial routes", Transportation, Vol. 8, No.2, pp.141-151.
- Pu, Wenjing (2011) "Analytic relationships between travel time reliability measures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2254, No.1, pp.122-130.
- Susilawati,????, Taylor, Michael A. P. and Somenahalli, Sekhar V. C. (2013) "Distributions of travel time variability on urban roads", Journal of Advanced Transportation, Vol. 47, No.8, pp.720-736.
- Taylor, Michael A. P. and Susilawati (2012) "Modelling travel time reliability with the burr distribution", Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 54, No.1, pp.75-83.
- Van Lint, J. W. C., van Zuylen, Henk J. and 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, Vol. 42, No.1, pp.258-277.
- Yao, Baozhen, Hu, Ping, Lu, Xiaohong, Gao, Junjie and Zhang, Mingheng (2014) "Transit network design based on travel time reliability", Transportation Research Part C :Emerging Technologies, Vol. 43, Part 3, pp.233-248.
- Yazici, M. Anil, Kamga, Camille and Mouskos, Kyriacos C. (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, Vol. 2308, No.1, pp.83-95.
- Yuan, Jing, Zheng, Yu, Zhang, Chengyang, Xie, Xing, and Sun, Guang-Zhong (2010) "An interactive-voting based map matching algorithm", Eleventh International Conference on Mobile Data Management, Kansas, USA.
- Yasuo. (2009) "Empirical analysis of travel time reliability measures in hanshin expressway network", Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No.1, pp.28-38.
- Khademi, Navid, Rajabi-Bahaabadi, Mojtaba, Shariat Mohaymany, Afshin and Samadzad, Mahdi. (2016) "Day-to-day travel time perception modeling using an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS)", EURO Journal on Transportation and Logistics, Vol. 5, No.1, pp.25-52.
- Kieu, Le-Minh, Bhaskar, Ashish and Chung, Edward (2014) "Public Transport Travel-Time Variability Definitions and Monitoring", Journal of Transportation Engineering, Vol. 141, No.1, pp.1-9.
- Lam, Terence C. and Small, Kenneth A. (2001) "The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 37, No. 2–3, pp. 231-251.
- Lim, Tjen-Sien and Loh, Wei-Yin (1996) "A comparison of tests of equality of variances", Computational Statistics & Data Analysis, Vol. 22, No.3, pp. 287-301.
- Ma, Zhenliang, Ferreira, Luis, Mesbah, Mahmoud and Zhu, Sicong (2016) "Modeling distributions of travel time variability for bus operations", Journal of Advanced Transportation, Vol. 50, No.1, pp. 6-24.
- Martchouk, Maria, Mannering, Fred and Bullock, Darcy (2010) "Analysis of freeway travel time variability using Bluetooth detection," Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, No.10, pp. 697-704.
- Mazloumi, Ehsan, Currie, Graham and Rose, Geoffrey (2009) "Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability", Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, No.7, pp. 623-631.

مجتبی رجبی بهاء‌آبادی، درجه کارشناسی خود در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در حال حاضر دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل‌ونقل است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل‌سازی در شرایط عدم قطعیت، قابلیت‌اطمینان زمان‌سفر و هوش مصنوعی است.



نوید خادمی، دوره پسا دکتری خود در رشته مهندسی حمل‌ونقل را در سال ۲۰۱۵ در دانشگاه سرژی پونتواز پاریس گذراند؛ دکتری خود را در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۹۰ و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان تحلیل‌های تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سامانه‌های حمل‌ونقل و مدل‌سازی رفتاری روان‌شناختی مسافران است. وی در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه تهران است.



روزبه فروزنده جوتقانی، درجه کارشناسی را در رشته مهندسی عمران- نقشه برداری در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی سامانه اطلاعات مکانی در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل‌های مکانی-زمانی، خودروهای کاوشگر و پیش‌بینی اشیا متحرک است



افشین شریعت مهیمنی، مدارج کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در دانشگاه علم و صنعت ایران به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۴ و ۱۳۸۰ اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان، مدیریت بحران، حمل و نقل همگانی و ترافیک است. وی در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



تحليل قابليت اطمینان زمان سفر خطوط اتوبوس