



Research Paper

Investigating Reliability and Stability Parameters of City Buses for Intra-city Transportation based on GPS

Fatemeh Moodi¹ , Amir Jahangard-Rafsanjani^{2*} , Negin Kazemzadeh³ , Fatemeh Matin⁴ 

¹ Ph.D. Student, Department of computer engineering, Yazd University, Yazd, Iran

^{2*} Assistance Professor, Department of computer engineering, Yazd University, Yazd, Iran

³ MSc of computer software engineering, Department of computer engineering, Yazd University, Yazd, Iran

⁴ MSc of computer software engineering, Department of computer engineering, Yazd University, Yazd, Iran



10.22080/USFS.2023.24661.2324

Received:

December 8, 2022

Accepted:

April 9, 2023

Available online:

July 4, 2023

Keywords:

Reliability, Stability Assessment, Headway Prediction, Smart City, Yazd City

Abstract

Today, the use of the GPS global positioning system for intra- and extra-urban transportation is a necessary and undeniable matter. Assessing the reliability and stability of intra-city bus routes has been raised as an important issue that has a great impact on the quality of bus services. In this research, the GPS global positioning system data, which is related to the Yazd City bus system, was used to evaluate the reliability and stability of city buses for intra-city transfers. One of the goals investigated in this research is to examine the parameters affecting bus bunching and analyze the stability of the system as well as the reliability of the public transportation system. In this research, section travel time, dwell time, headway, and bus bunching have been analyzed in terms of time and place. In fact, it is checked how the situation of batch movement occurrence and stability is at different times of the day. In this research, the prediction methods of Linear Regression, Support Vector Regression, Random Forest, and Gradient Boosting Regression were used to predict the reliability and stability assessment of bus travel routes. The Gradient Boosting Regression Model had a lower error and better performance for predicting the reliability of the bus travel route and headway than the rest of the prediction models. The results of this research help urban planners understand the stability of stations, identify key points that affect the stability of stations, identify key stations, and provide better transportation services in the future to reduce the waiting time of passengers.

* Corresponding Author: Amir Jahangard-Rafsanjani

Address: Department of computer engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Email: jahangard@yazd.ac.ir

Tel: 035-31232362



Extended Abstract

1. Introduction

Assessing the reliability and stability of bus routes has a great impact on the quality of bus services. Improving the sustainability of the public transport system is significant for operators and passengers. Identifying the points and factors affecting bus bunching and predicting the headway of the bus to the next stop helps urban planners to increase the efficiency of the public transportation system and reduce passengers' waiting time. In the past years, a large number of cities have started to monitor the location of public transportation using the Global Positioning System (GPS). Due to the high frequency and periodicity of information, GPS data includes a large amount of data and can provide a wide range of monitoring and analysis programs for the bus system. Measuring the reliability and stability of bus service is one of the popular fields of research in recent decades. Urban planners can check the overall reliability of all buses, identify unreliable bus lines, and consider necessary changes if needed. On the other hand, according to the reliability of the bus stations around a particular bus line, passengers can decide whether they will use this bus line now or later. Improving the reliability of the bus system encourages passengers to use public transportation and as a result, the share of traveling by private vehicles decreases. Urban planners are trying to improve the quality of public transportation services to attract more passengers and reduce operating costs. To achieve this goal, the order of bus headway should be planned as much as possible. Irregular headway of the bus may lead to bus bunching and increase the waiting time of

passengers, which is an influencing factor on passengers' attitudes. Therefore, evaluating the performance of bus service and the stability of stations and predicting the headway of the bus is very important for bus operators and urban planners. For this purpose, GPS data of buses, data of stations, and bus routes of Yazd City were used in this research.

2. Research Methodology

In this research, the parameters affecting bus bunching such as segment travel time, dwell time, headway, and bus bunching in terms of time and space, as well as system stability and reliability of the public transportation system were analyzed. The situation of bus bunching occurrence and stability and reliability were checked at different times of the day.

Buses and public transportation in general are among the most important components of transportation services in urban areas. Examining the reliability and stability of bus service helps public transportation organizations to provide better services to passengers. In this section, first, the necessary information about the data used for analyzing the reliability of the bus service is stated. After data preprocessing, the line number is recognized for each bus, and then the reliability and planned headway are calculated. Consequently, the performance and stability of the bus service are evaluated.

In this research, supervised machine learning models were used to predict the reliability of bus travel and headway. Supervised machine learning models for prediction include linear regression, support vector regression, gradient boosting



regression (GBR), and random forest regression. The goal was to predict the future reliability of bus travel, which is important for passengers and bus performance. The dataset related to line 11 of Yazd City was considered for prediction. The used hyperparameters were set for prediction and a random search method with cross-validation was used to limit the parameter values. Then, to optimize the model, grid search with cross-validation was utilized.

Moreover, inputs to predict the distance to the next station included travel time, distance to the previous station, dwell time, days of the week, station number, time of the day, and bus number. Also, a random search method with cross-validation was used to limit the values of the parameters to predict the headway. Consequently, to optimize the model, grid search with cross-validation was utilized. The prediction performance of regression models by three parameters of the mean absolute value of error (MAE), percentage of the mean absolute value of error (MAPE), and percentage of the symmetric mean absolute value of error (SMAPE) were evaluated with real target values in the test data set and predicted target values.

3. Research Findings

The results of this research help urban planners to understand the stability of stations, identify key points that affect the stability of stations, identify key stations, and provide better transportation services in the future to reduce the waiting time of passengers. In this study, MAE and MAPE were used to evaluate the performance of the proposed models to predict reliability. According to the MAPE and MAE values, the

gradient-boosting regression has the best performance. Also, linear regression has higher MAPE and MAE values and as a result, has worse performance than other methods.

4. Conclusion

Headway prediction and performance analysis of urban bus service and the stability of stations have become important matters in recent years. In this research, the GPS data of buses and bus stations of Yazd City were used. The reliability score for each station and bus travel route and each line was calculated by a weighted linear combination method. Six bus lines of Yazd City were used to evaluate the stability and reliability of city buses and one bus line was used for predicting the line headway and bus travel reliability. The indicators necessary to evaluate the performance of city buses, the reliability of bus travel, and the stability of the stations were calculated and then the status of the parameters affecting the bus bunching and the stability of the line and stations were investigated. The results revealed that the reliability score decreases as the path length increases. Many factors, such as passenger demand, street traffic conditions, bus capacity, dwell time, and segment travel time contribute to the loss of order and bus bunching. Increasing or decreasing the stopping time and travel time of the department can destroy the order of the distance. Based on the analysis, the dwell time in most stations does not fluctuate and is in the range of 5 to 20 seconds. Also, the average dwell times of the lines at different times of the day are different due to the number of passengers. The large variation in section travel time at the stations of some sections indicates that these sections are the main ones. Also, the average travel time



values of the lines are different at different times of the day due to the traffic conditions of the street. The stability of the line and stations has been investigated according to the bus bunching conditions and the average headway deviation at the level of the stations. Based on the headway time-space diagram, most of the bus bunching points occur from noon to night when it is crowded and many buses are dispatched. The stability of the end stations of the route is less, while this stability is more in the early hours of the day. For the effective sustainability of the headway, urban planners should pay more attention to these times and stations and take the necessary measures, according to the headway, to prevent bus bunching. Therefore, in this research, the prediction has been applied using supervised regression machine learning models, and the gradient-boosting regression model has performed better than other models.

Compared to the results of previous studies, i.e. SVR and AOSVM algorithms, the results of headway prediction of this research had the best performance for headway prediction according to the MAE evaluation criteria. In this research, the

gradient boosting regression model had the best performance with an accuracy of 15.29 seconds for the prediction of headway, which is improved compared to these two articles. Also, regarding the results of predicting the reliability of the bus service related to the previous studies that used the random forest method and the AOSVM method, respectively, the gradient boosting regression model in this research had the best performance for predicting travel reliability with an accuracy of 6.38%.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors appreciate all the scientific consultants in this paper.



علمی پژوهشی

بررسی پارامترهای قابلیت اطمینان و پایداری در اتوبوس‌های شهری برای نقل و انتقالات درون شهری براساس GPS

فاطمه مودی^۱ ID، امیر جهانگرد رفسنجانی^{۲*} ID، نگین کاظم زاده^۳ ID، فاطمه متین^۴ ID

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
^۲ استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
^۳ گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
^۴ گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.



10.22080/USFS.2023.24661.2324

چکیده

امروزه استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی GPS برای حمل‌ونقل درون و برون‌شهری امری لازم و غیرقابل انکار است. ارزیابی قابلیت اطمینان و پایداری مسیرهای اتوبوس درون شهری به‌عنوان یک موضوع مهم مطرح شده است که تأثیر زیادی بر کیفیت خدمات اتوبوس‌رانی می‌گذارد. در این پژوهش از داده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی GPS که مربوط به سامانه اتوبوس‌رانی شهر یزد است، برای ارزیابی قابلیت اطمینان و پایداری در اتوبوس‌های شهری برای نقل و انتقالات درون شهری استفاده شده است. یکی از اهداف مورد بررسی در این پژوهش، بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر حرکت دسته‌ای و تحلیل پایداری سیستم و همچنین قابلیت اطمینان سیستم حمل‌ونقل عمومی است. در این پژوهش زمان سفر بخش، زمان توقف، سرفاصله و حرکت دسته‌ای از نظر زمانی و مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در واقع بررسی می‌شود که در دوره‌های زمانی مختلف روز، وضعیت وقوع حرکت دسته‌ای و پایداری و همچنین قابلیت اطمینان چگونه است. در این پژوهش از روش‌های پیش‌بینی رگرسیون خطی، رگرسیون بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون تقویت‌شده گرادیان برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان و بررسی پایداری مسیرهای سفر اتوبوس استفاده شده است. مدل رگرسیون تقویت‌شده گرادیان برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان مسیر سفر اتوبوس و همچنین جهت پیش‌بینی سرفاصله خطای کمتر و عملکرد بهتری را نسبت به بقیه مدل‌های پیش‌بینی داشته است. نتایج این پژوهش به برنامه‌ریزان شهری در درک پایداری ایستگاه‌ها، شناسایی نقاط کلیدی که بر پایداری ایستگاه‌ها تأثیر می‌گذارد، شناسایی ایستگاه‌های کلیدی و ارائه بهتر خدمات حمل‌ونقل در آینده، جهت کاهش زمان انتظار مسافران کمک می‌کند.

تاریخ دریافت:

۱۷ آذر ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش:

۲۰ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ انتشار:

۱۳ تیر ۱۴۰۲

کلیدواژه‌ها:

قابلیت اطمینان،

ارزیابی پایداری،

پیش‌بینی سرفاصله،

شهر هوشمند، شهر یزد

* نویسنده مسؤل: امیر جهانگرد رفسنجانی

آدرس: استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی

کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

ایمیل: jahangard@yazd.ac.ir

تلفن: ۰۹۱۲۲۰۷۸۳۱۴



۱ مقدمه

غیر قابل اطمینان را شناسایی کنند و در صورت نیاز تغییرات لازم را در نظر بگیرند. از طرف دیگر مسافران می‌توانند با توجه به قابلیت اطمینان ایستگاه‌های اتوبوس در اطراف یک خط اتوبوس خاص تصمیم بگیرند آیا در حال حاضر یا بعداً از این خط اتوبوس استفاده خواهند کرد یا خیر. بهبود قابلیت اطمینان سامانه اتوبوسرانی باعث ترغیب مسافران به استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی می‌شود و سهم سفر با وسایل نقلیه شخصی کاهش می‌یابد. برنامه‌ریزان شهری در تلاش هستند تا کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی را به منظور جذب مسافران بیشتر و کاهش هزینه‌های عملیاتی بهبود بخشند. برای دستیابی به این هدف، نظم سرفاصله اتوبوس باید تا حد ممکن برنامه‌ریزی شود. سرفاصله نامنظم اتوبوس، ممکن است منجر به حرکت دسته‌ای^۱ و افزایش زمان انتظار مسافران شود، زمان انتظار مسافران عامل تأثیرگذار بر نگرش مسافران است. بنابراین ارزیابی عملکرد سرویس اتوبوس و پایداری ایستگاه‌ها و پیش‌بینی سرفاصله اتوبوس برای اتوبوسرانی و برنامه‌ریزان شهری از اهمیت زیادی برخوردار است. برای این منظور، در این پژوهش از داده‌های GPS اتوبوس‌ها، داده‌های ایستگاه‌ها و مسیرهای اتوبوس شهر یزد استفاده شده است.

ابتدا مفاهیم مورد استفاده، سپس مروری بر کارهای پیشین ارائه می‌شود. پس از آن رویکرد پیشنهادی و نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان و پایداری سرویس اتوبوس و همچنین ارزیابی دقت مدل‌های یادگیری ماشین مورد بحث قرار گرفته شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای آینده ارائه شده است.

بهبود پایداری سیستم حمل‌ونقل عمومی برای اپراتورها و مسافران قابل توجه است. شناسایی نقاط و عوامل مؤثر بر حرکت دسته‌ای و پیش‌بینی سرفاصله^۱ اتوبوس در ایستگاه بعدی، برای افزایش کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی و کاهش زمان انتظار مسافران، به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند. یکی از اهداف در این پژوهش، بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر حرکت دسته‌ای و تحلیل پایداری سیستم حمل‌ونقل عمومی و همچنین ارزیابی قابلیت اطمینان سرویس‌های اتوبوس شهری از طریق محاسبه امتیاز است. از جمله پارامترهایی که بررسی می‌شود، زمان توقف^۲، زمان سفر بخش^۳، سرفاصله و طول مسیر سفر است. در واقع بررسی می‌شود که در دوره‌های زمانی مختلف روز، وضعیت وقوع حرکت دسته‌ای و پایداری چگونه است. نتیجه این تحلیل به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند، مسیرهای اتوبوس با کارایی بالا را در ساعت‌هایی که مسیر و ایستگاه‌ها ناپایدار هستند، اجرا کنند.

در سال‌های گذشته تعداد زیادی از شهرها نظارت بر موقعیت وسایل حمل‌ونقل عمومی را با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی^۴ (GPS) آغاز کرده‌اند. داده‌های GPS با توجه به فرکانس و تناوب زیاد اطلاعات، حجم زیادی از داده‌ها را دربرمی‌گیرند و می‌توانند طیف گسترده‌ای از برنامه‌های نظارت و تحلیل را برای سامانه اتوبوسرانی فراهم کنند. اندازه‌گیری قابلیت اطمینان^۵ و پایداری^۶ سرویس اتوبوس یکی از زمینه‌های محبوب محققین دردهه‌های اخیر است. برنامه‌ریزان شهری می‌توانند قابلیت اطمینان کلی را برای همه اتوبوس‌ها بررسی کنند و از روی نتایج به‌دست آمده، خطوط اتوبوس

⁵ Reliability

⁶ Stability

⁷ Bus Bunching

¹ Headway

² Dwell Time

³ Section Travel Time

⁴ Global Positioning System



۲ مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در این بخش برخی از شاخص‌های قابلیت اطمینان و تحلیل پایداری و عملکرد سیستم حمل‌ونقل عمومی معرفی شده‌است. در ادامه پیشینه تحقیق آورده شده‌است.

۲٫۱ قابلیت اطمینان

یکی از جنبه‌های اصلی برای اندازه‌گیری عملکرد یک سیستم، قابلیت اطمینان آن است. بنابراین مفهوم قابلیت اطمینان نه‌تنها برای کاربران حمل‌ونقل عمومی، بلکه برای اپراتورهای اتوبوس و نهادهای نظارتی نیز دارای اهمیت است (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). قابلیت اطمینان را می‌توان در سطوح مختلف، یا در طول برنامه‌ریزی استراتژیک، برنامه‌ریزی تاکتیکی، یا برنامه‌ریزی عملیاتی و در طول عملیات مورد بررسی قرار داد. در سطح برنامه‌ریزی استراتژیک، افزودن خطوط اختصاصی برای اتوبوس‌ها می‌تواند قابلیت اطمینان سرویس را افزایش دهد، در حالی که در طول عملیات، نگهداری اتوبوس راه‌حلی محبوب برای کاهش خطرات انباشتگی اتوبوس است (ریکارد^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). برخی از مطالعات، قابلیت اطمینان را مرتبط با ثبات زمان سفر می‌دانند (پولوس^۳، ۱۹۷۸)، برخی دیگر قابلیت اطمینان را به معنای پایداری به جدول زمانبندی اتوبوس‌ها می‌دانند (بیتس^۴ و همکاران، ۲۰۰۱). قابلیت اطمینان، عبور اتوبوس از تمام ایستگاه‌های موجود در طول مسیر و توقف به موقع در ایستگاه‌ها طبق برنامه از پیش تعریف‌شده، است (وانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷).

۲٫۲ پایداری

پایداری یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی کیفیت خطوط اتوبوس‌رانی است. پایداری در صورتی که سرفاصله بین اتوبوس‌ها منظم باشد، رخ می‌دهد.

فاصله زمانی بین دو اتوبوس متوالی را سرفاصله می‌گویند. در صورت عدم پایداری، مفهومی به نام حرکت دسته‌ای اتفاق می‌افتد. حرکت دسته‌ای به این معنی است که دو یا چند اتوبوس در مدت زمان بسیار کمی به یک ایستگاه اتوبوس می‌رسند (آندرس^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). این پدیده نتیجه کاهش سرفاصله است، که مدت زمان طولانی انتظار برای مسافران و کارایی پایین در سرویس حمل‌ونقل را به همراه دارد.

۲٫۳ سرفاصله

به فاصله زمانی بین حرکت دو وسیله نقلیه متوالی که در یک مسیر و یک جهت حرکت می‌کنند، سرفاصله گفته می‌شود، که در رابطه (۱) آورده شده‌است.

$$\Delta H_k^{i,j} = \begin{cases} 0 & j = 1 \\ |h_k^{i,j+1} - h_k^{i,j}| & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

$\Delta H_k^{i,j}$ سرفاصله بین اتوبوس j و اتوبوس $j+1$ از خط i در ایستگاه k است و $h_k^{i,j}$ اشاره به زمان ورود اتوبوس j خط i در ایستگاه k دارد.

برای محاسبه سرفاصله باید در ایستگاه‌های هر خط، اتوبوس‌ها بر اساس ترتیب زمان ورودشان به ایستگاه، در طول هر روز مرتب شوند. برای هر ایستگاه، زمان‌های رسیدن دو اتوبوس متوالی را از هم کم کرده و حاصل در ویژگی جدید سرفاصله ذخیره می‌شود. به این نکته باید توجه شود هنگامی که شماره در مسیر ایستگاه تغییر می‌کند، سرفاصله اتوبوس اول ایستگاه بعدی صفر است. همچنین سرفاصله اتوبوس اول در ایستگاه اول، نیز صفر است.

به‌طور معمول زمان سفر شامل زمان سفر بین ایستگاه‌ها (زمان سفر بخش) و زمان توقف در

⁴ Bates

⁵ Wang

⁶ Andres

¹ Liu

² Ricard

³ Polus

عوامل تصادفی تغییر می‌کند. برای محاسبه انحراف سرفاصله هر اتوبوس، نیاز به داشتن سرفاصله برنامه‌ریزی‌شده برای هر خط است. شاخص IPO که به‌عنوان شاخص پایداری سرفاصله استفاده می‌شود در رابطه (۲) بیان شده‌است.

$$IPO = \frac{\sum_{j=1}^n |h_k^{j*} - h_k^j|}{n} \quad (2)$$

h_k^{j*} سرفاصله برنامه‌ریزی‌شده اتوبوس j در ایستگاه k ، h_k^j سرفاصله مشاهده‌شده اتوبوس j در ایستگاه k و n تعداد اتوبوس‌های مشاهده‌شده است.

۲٫۷ پیشینه تحقیق

قابلیت اطمینان و پایداری جنبه‌های کلیدی کیفیت خدمات اتوبوس برای مسافران و برنامه‌ریزان شهری هستند. ابتدا مروری بر کارهای گذشته جهت ارزیابی این دو پارامتر صورت می‌گیرد و در ادامه پیشینه پژوهش روش‌های پیش‌بینی آن‌ها بیان می‌شود.

لین^۵ و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ای با عنوان "پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوس در زمان واقعی: مطالعه موردی برای جینان، چین" روشی برای پیش‌بینی ورود اتوبوس در زمان واقعی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی^۶ (ANN) و شبکه عصبی مصنوعی سلسله‌مراتبی^۷ (HANN) ارائه کردند. این روش براساس داده‌های GPS برای شهر جینان چین بررسی شده‌است. روش ارائه‌شده شامل چهار نوع متغیر از جمله شاخ زمان، سطح تأخیر اتوبوس، زمان ورود و توزیع سرفاصله و داده‌های سیستم جمع‌آوری کرایه اتوماتیک^۸ (AFC) است. نتایج نشان داده است که مدل‌های ارائه‌شده بهتر از مدل فیلتر کالمن به ویژه برای پیش‌بینی ورود اتوبوس بین ایستگاه‌های همسایه بودند. در شرایط ترافیک، خطای

ایستگاه است، که دو عامل برای ایجاد سرفاصله نامنظم هستند (آن^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).

۲٫۴ زمان سفر بخش اتوبوس

زمان سفر بخش اتوبوس (زمان سفر بین ایستگاه‌ها)، مدت زمان گذر بین دو ایستگاه متوالی است و به‌صورت اختلاف زمان خروج اتوبوس از ایستگاه قبل از زمان ورود اتوبوس به ایستگاه بعد به‌دست می‌آید (جونگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۴). زمان سفر بخش اتوبوس در ایستگاه اول مسیر، صفر است. زمان سفر بخش و زمان توقف در این پژوهش به تانیه تبدیل شده‌اند.

۲٫۵ زمان توقف اتوبوس

زمان توقف اتوبوس، زمان صرف‌شده در ایستگاه‌های اتوبوس شامل زمان باز و بسته شدن درها و زمان سوار و پیاده شدن مسافران است (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). به‌طور کلی، تعداد مسافرانی که سوار و پیاده می‌شوند، حالت‌های پرداخت و وضعیت شلوغی ایستگاه‌ها عامل کلیدی تأثیرگذار بر زمان توقف هستند. برای محاسبه زمان توقف هر اتوبوس در ایستگاه‌های مسیر و زمان سفر بخش، باید داده‌ها برای هر خط، بر اساس ترتیب ایستگاه در مسیر که طبق شماره در مسیر مشخص است و به‌ترتیب زمانی در طول هر روز مرتب شوند. زمان توقف، حاصل اختلاف زمان خروج اتوبوس j از زمان ورود اتوبوس j در ایستگاه k است.

۲٫۶ شاخص پایداری سرفاصله

شاخص پایداری سرفاصله، نشان‌دهنده انحراف سرفاصله^۴ مشاهده‌شده در مقابل سرفاصله برنامه‌ریزی شده‌است. در سیستم‌های اتوبوس، سرفاصله مشاهده‌شده به طور دقیق با سرفاصله برنامه‌ریزی شده مطابقت ندارد، چون اتوبوس در بیشتر مواقع نمی‌تواند به موقع برسد و سرفاصله مطابق با

⁵ Lin

⁶ Artificial Neural Network

⁷ Hierarchical Artificial Neural Network

⁸ Automatic Fare Collection

¹ An

² Jeong

³ Zhang

⁴ Deviation of headway



تأثیرگذار که مربوط به تغییرپذیری سرفاصله هستند، از داده‌های کارت هوشمند شناسایی شده و محاسبه می‌شوند. سپس از شاخص‌های سرفاصله، تقاضای مسافر و زمان سفر محاسبه شده، برای پیش‌بینی سرفاصله در ایستگاه‌های بعدی استفاده شده‌است. الگوریتم $LS-SVM^7$ الگوی پیش‌بینی سرفاصله برای شناسایی حرکت دسته‌ای ایجاد شده‌است. سرانجام، رابطه‌ای بین سرفاصله پیش‌بینی شده و وقوع حرکت دسته‌ای برای تشخیص نوسان نامنظم سرفاصله برقرار شده‌است. اثربخشی روش پیشنهادی بر روی دو مسیر در پکن بررسی شده‌است. با توجه به محاسبه پارامترهای $RMSE^8$ و $MAPE$ این روش نسبت به روش‌های ANN^9 ، KNN^9 و RF^{10} عملکرد بهتری داشته‌است. این دو پارامتر به ترتیب برای مدل $LS-SVM$ در مسیر اول، ۵.۹۳ و ۱۵.۸۰ درصد و در مسیر دوم ۲.۳۶ و ۵.۱۹ درصد به دست آمده‌اند. روش پیش‌بینی ارائه شده می‌تواند با موفقیت بیش از ۹۵ درصد، موارد حرکت دسته‌ای را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های پیش‌بینی شناسایی کند.

موریرا-ماتياس^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با نام "یک رویکرد یادگیری آنلاین برای حذف حرکت دسته‌ای اتوبوس در زمان واقعی" یک روش پیش‌بینی برای کاهش پدیده حرکت دسته‌ای در زمان واقعی ارائه کردند. در این روش ترکیبی از یادگیری ماشین و روش‌های استخراج اطلاعات با ارزش از داده‌های مکانی خام GPS استفاده شده‌است. روش‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل رگرسیون، استدلال احتمالی و یادگیری ادراکی بلوک‌های ساختاری روش پیش‌بینی ارائه شده هستند. عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از مسیر ۱۸ اتوبوس در پورتو، پرتغال طی مدت یک سال ارزیابی شده‌است. خروجی پیش‌بینی برای

پیش‌بینی نسبی^۱ در یک بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای کمتر از ۲۰% با احتمال اطمینان بیش از ۵۸% است. مهم‌تر از همه، روش پیشنهادی آن‌ها سازگار با محاسبه با زمان کالیبراسیون کمتر از ۲ دقیقه است، که باعث می‌شود در سیستم پیش‌بینی ورود اتوبوس در زمان واقعی قابل اجرا باشد. همچنین برای مقابله با مشکل در گرفتن نوسانات ترافیکی، مجموعه داده جمع‌آوری شده خوشه‌بندی شده‌است، سپس مدل Sub ANN برای هر خوشه ایجاد شده و در یک مدل ANN سلسله مراتبی ادغام شدند.

وربیچ^۲ و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی تحت عنوان "آیا آنها هنوز دسته جمعی شده‌اند؟ یک مطالعه اکتشافی از تأثیرات حرکت دسته‌ای بر زمان توقف و کارکردن"، روشی برای فهمیدن و درک این‌که چگونه حرکت دسته‌ای می‌تواند عملیات اتوبوس به‌ویژه زمان سفر بخش و زمان توقف را تحت تأثیر قرار دهد را ارائه دادند. در این روش از داده‌های^۳ AVL و APC^۴ از تری مت، پورتلند استفاده شده‌است. با استفاده از مدل‌سازی خطی و تحلیل آماری زمان سفر بخش و زمان توقف، نتیجه گرفته شده که حرکت دسته‌ای، زمان توقف و زمان سفر بخش را افزایش می‌دهد، بنابراین برنامه‌ریزان و اپراتورهای حمل‌ونقل عمومی باید در نظر بگیرند که زمان بیشتری را بین اتوبوس‌های متوالی از مسیرهای مختلف در ایستگاه‌های مشترک در نظر بگیرند، تا تأثیرات منفی حرکت دسته‌ای را به حداقل برسانند.

یو^۵ و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان "پیش‌بینی حرکت دسته‌ای اتوبوس مبتنی بر پیش‌بینی با استفاده از داده‌های کارت هوشمند حمل‌ونقل" یک روش پیش‌بینی برای ضبط بی‌نظمی سرفاصله در سطح ایستگاه‌ها براساس داده‌های کارت هوشمند^۶ ارائه کردند. در این روش ابتدا عوامل

⁷ Least Squares Support Vector Machine

⁸ Root Mean Squared Error

⁹ K-Nearest-Neighbor

¹⁰ Random Forest

¹¹ Moreira-Matias

¹ Relative Prediction Error

² Verbich

³ Automatic Vehicle Location

⁴ Automatic Passenger Counter

⁵ Yu

⁶ Smart Card Data



زمان سفر، سرعت متوسط و ضریب تغییرات سرعت را در یک بازه زمانی مشخص انتخاب کرد. سپس آن‌ها از یک رویکرد رگرسیون چندکی^۴ برای جلوگیری از ناهمگونی در داده‌های سرعت و ضریب تغییرات سرعت، استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون چندکی در مقایسه با مدل‌های رگرسیون شرطی مبتنی بر میانگین مانند OLS^۵ و SURE^۶ اطلاعات بیشتری را نشان می‌دهد.

ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای تحت عنوان "تحلیل آماری پایداری وسایل نقلیه اتوبوسی براساس داده‌های مسیر GPS" روشی برای ارزیابی عملکرد عملیاتی مسیرهای اتوبوس براساس داده‌های GPS جمع‌آوری شده از جینان در چین ارائه کردند. در این مطالعه، زمان سفر مسیرها، زمان سفر بخش، زمان توقف و حرکت دسته‌ای بررسی شده‌است. طبق تحلیل‌های آماری^۸ انجام شده زمان سفر بخش بین دو ایستگاه متوالی در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت است و در ساعت‌های اوج عصر بیشتر است. زمان توقف نیز بررسی شده‌است و تحلیل‌های آماری انجام شده برای آن بیانگر این است، که در اکثر ایستگاه‌ها به جز برخی از ایستگاه‌ها تغییرات بزرگی در زمان توقف مشاهده نشده‌است، که این امر به شناسایی ایستگاه‌های کلیدی کمک می‌کند. نتایج حاکی از آن است که در ساعت‌های اوج و بخش‌های پر ازدحام خیابان، حرکت دسته‌ای به آسانی اتفاق می‌افتد.

گو^۹ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با نام "پیش‌بینی قابلیت اطمینان خدمات حمل‌ونقل بیشتر براساس ماشین بردار پشتیبان"، یک روش ارزیابی قابلیت اطمینان برای دستیابی به قابلیت اطمینان ایستگاه‌های اتوبوس و سطح سرویس مسیر اتوبوس ارائه کردند. فاصله زمانی بین دو اتوبوس متوالی که در یک ایستگاه می‌رسند، به

انتخاب یک عمل اصلاح‌کننده استفاده شده‌است، تا به‌طور خودکار مانع حرکت دسته‌ای شود. پارامتر MAE براساس ایستگاه، ۲۴٫۷۱ و براساس سفر، ۷۱٫۹۸ اندازه‌گیری شده‌است. این روش حرکت دسته‌ای را تا ۶۸ درصد و میانگین زمان انتظار مسافر را تا ۴۵ درصد کاهش داده است.

سان^۲ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با نام "مدل پیش‌بینی قابلیت اطمینان خدمات اتوبوس بیشتر براساس جنگل تصادفی"، قابلیت اطمینان مسیر اتوبوس را با توجه به سه جنبه عملیاتی، ایستگاه و اتوبوس در نظر گرفتند. جنبه عملیاتی از لحاظ تئوری، فاصله اتوبوس‌ها باید با فاصله عزیمت اتوبوس‌ها، برابر باشد. جنبه ایستگاه یعنی زمان رسیدن واقعی اتوبوس در مقایسه با جدول زمانی دارای تأخیر کمتر باشد. جنبه اتوبوس به تراکم تعداد مسافران نسبت به مقدار تئوری در نظر گرفته اشاره دارد. سپس یک روش پیش‌بینی قابلیت اطمینان سرویس اتوبوس با استفاده از روش جنگل تصادفی ارائه شده‌است. با توجه به اطلاعات آنلاین سه فاکتور مؤثر شامل وضعیت ترافیک جاده‌ای، تعداد تقاطع‌ها و وضعیت نامشخص به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل پیش‌بینی در نظر گرفته شده و شاخص ارزیابی کیفیت خدمات، متغیر خروجی است. مدل پیش‌بینی قابلیت اطمینان ارائه شده در این پژوهش با داده‌های خط اتوبوس شماره ۲۳ دالیان چین آزمایش شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به معیار ارزیابی MAPE، روش جنگل تصادفی با پارامترهای مناسب، عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان دارد.

ما^۳ و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان "تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه قابلیت اطمینان زمان سفر ترانزیت با مکان‌یابی خودکار وسیله نقلیه و داده‌های فاکتور" برای توصیف قابلیت اطمینان،

^۵ Ordinary Least Squares

^۶ Seemingly Unrelated Regression Equation

^۷ Zhang

^۸ Statistical Analysis

^۹ Gu

^۱ Trip

^۲ Sun

^۳ Ma

^۴ Quantile Regression



اطراف ایستگاه‌ها در عرض ۱ کیلومتر، توزیع نمایی را دنبال می‌کند. علاوه بر این، توزیع میانگین سرفاصله و انحراف سرفاصله در ایستگاه‌ها lognormal است. سپس از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی آگلومرا^۵ برای تقسیم ایستگاه‌های اتوبوس به گروه‌های مختلف استفاده شده است، که ایستگاه‌های اتوبوس جینان به چهار گروه با ویژگی‌های واضح تقسیم شده‌اند.

محمد و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله‌ای تحت عنوان "شناسایی عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان زمان سفر برای حمل‌ونقل اتوبوسی"، فاصله بین زمان سفر مورد انتظار و زمان سفر واقعی را به عنوان معیار ارزیابی قابلیت اطمینان زمان سفر اتوبوس در نظر گرفتند. سپس عواملی که بر قابلیت اطمینان زمان سفر اتوبوس تأثیر می‌گذارد، شامل طول مسیر، تعداد تقاطع‌ها، روزهای هفته، ایستگاه‌های اتوبوس، تأخیرهای خروج، خط اتوبوس، سوار شدن و پیاده شدن مسافران، وضعیت آب و هوا مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه درسه مسیر اتوبوس مختلف شهر کوالالامپور انجام شد.

هوانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله‌ای با نام "پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوس و تحلیل قابلیت اطمینان: مقایسه تجربی تحلیل داده‌های عملکردی و رگرسیون بردار پشتیبان بیزی" رویکردهایی داده محور براساس تحلیل داده‌های عملکردی^۷ (FDA) و رگرسیون بردار پشتیبانی بیزی^۸ (BSVR) برای پیش‌بینی زمان سفر کوتاه مدت اتوبوس با پیش‌بینی عدم قطعیت‌های مختلف، پیشنهاد کردند. داده‌های مورد استفاده، داده‌های حمل‌ونقل اتوبوس جمع‌آوری شده از مسیر اتوبوس شماره ۲۶۱ در گوانگژو است. پس از تخمین مدل از مجموعه داده آموزشی، مجموعه داده آزمون برای مقایسه قابلیت‌های پیش‌بینی رویکردهای FDA و BSVR از جمله ارزیابی شاخص‌های عملکرد و عدم

عنوان اساس ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. سپس قابلیت اطمینان برای خدمات حمل‌ونقل در آینده با استفاده از AOSVM^۱ پیش‌بینی شده است. در پیش‌بینی قابلیت اطمینان، هدف پیش‌بینی توسط افق نورد قفل می‌شود تا تداخل سایر اطلاعات را کاهش دهد. براساس داده‌های GPS و مسیر اتوبوس ۱۰ دالین چین، روش پیش‌بینی ارائه شده ارزیابی می‌شود. الگوریتم AOSVM در مقایسه با الگوریتم‌های ANN، KNN و LR، بهترین عملکرد پیش‌بینی را داشته است. شاخص ارزیابی MAPE برای الگوریتم AOSVM، ۹٫۳۰ درصد و شاخص ارزیابی MAE، ۲۸٫۵ به دست آمده است.

کیفیت خدمات سیستم اتوبوس به دلایلی مانند سرفاصله‌های طولانی، زمان سفر طولانی، قابلیت اطمینان و پایداری کم، پایین است. انحراف سرفاصله و سرفاصله دو شاخص مهم برای نشان دادن عملکرد عملیات اتوبوس هستند، که سرفاصله‌های کوچک باعث کاهش زمان انتظار مسافران می‌شوند. برای افزایش کیفیت خدمات سیستم اتوبوس، نقش و عملکرد ایستگاه‌ها اهمیت زیادی دارند. بدین منظور، ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با نام "کشف الگوهای ایستگاه شبکه حمل‌ونقل شهری با داده‌های چند منبعی: شواهد تجربی در جینان، چین"، یک چارچوب مبتنی بر داده برای تجزیه و تحلیل الگوهای ایستگاه‌ها با داده‌های ساختار شبکه^۲، داده‌های POI^۳ و داده‌های مسیر GPS ارائه کردند. داده‌های ساختار شبکه منعکس-کننده ویژگی‌های توپولوژی، تعداد POI در اطراف ایستگاه برای بیان جذابیت ایستگاه‌ها، سرفاصله و انحراف سرفاصله برای نشان دادن عملکرد عملیاتی هستند. نتایج ساختار توپولوژی^۴ نشان می‌دهد، که تعداد کمی از ایستگاه‌ها وجود دارد که نقش مهمی در شبکه اتوبوس دارند، همچنین تعداد POI در

⁵ Agglomerative Hierarchical Clustering Method

⁶ Huang

⁷ Functional Data Analysis

⁸ Bayesian Support Vector Regression

¹ Accurate Online Support Eector Machine

² Network structure data

³ Points of interest

⁴ Topology structure

براساس نتایج مدل VMD-LSTM بهتر از سایر مدل‌های پیش‌بینی عمل می‌کند.

لیو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله‌ای تحت عنوان "درک زمان سفر اتوبوس شهری: تجزیه و تحلیل آماری و پیش‌بینی یادگیری عمیق" یک مدل فیلتر Kalman-LSTM برای پیش‌بینی زمان سفر اتوبوس پیشنهاد کردند. تقویت طبقه‌بندی (CatBoost)، تقویت گرادیان شدید (XGBoost) و تقویت گرادیان نور (LightGBM) برای مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر آن، در اینجا کل فرآیند زمان سفر، از جمله زمان سفر بین توقف‌ها، زمان اقامت و قابلیت اطمینان سفر، بر اساس AVL تاریخی تحلیل می‌شود. داده‌های AVL مورد استفاده در این مقاله از شرکت اتوبوس‌رانی جینان مشتق شده است. مدل فیلتر Kalman-LSTM در پیش‌بینی سری‌های زمانی، داده‌های کثیف می‌توانند بر نتایج پیش‌بینی‌های تأثیر بگذارند. الگوریتم فیلتر کالمن با توانایی محاسبه مقدار نتیجه خروجی بهینه برای هر مرحله بر اساس سری‌های زمانی تاریخی به صورت بازگشتی مشخص می‌شود. سپس با توجه به برآوردهای قبلی و مشاهدات اخیر می‌توان بهترین پیش‌بینی را ارائه داد. براساس نتایج، فیلتر Kalman-LSTM بالاترین دقت را نسبت به CatBoost، XGBoost، LightGBM دارد.

۳ روش تحقیق

اتوبوس‌ها و به‌طور کلی حمل‌ونقل عمومی جزء مهمترین مؤلفه‌های خدمات حمل‌ونقل در مناطق شهری هستند. بررسی قابلیت اطمینان و پایداری سرویس اتوبوس به سازمان‌های حمل‌ونقل عمومی کمک می‌کند که خدمات بهتری برای مسافران ارائه دهند. در این بخش، ابتدا اطلاعات لازم در مورد داده‌های به‌کار گرفته‌شده برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سرویس اتوبوس بیان می‌شود.

قطعیت‌های مرتبط با این پیش‌بینی‌ها استفاده شد. روش‌های پیشنهادی FDA و BSVR که در ارتباط با عملکرد تأخیرتودرتوی احتمالی اعمال می‌شوند، هنگام انجام پیش‌بینی‌ها در شرایط ترافیکی مختلف، بسیار رقابتی هستند. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد که FDA نتایج پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه می‌دهد و تمایل دارد عدم قطعیت‌ها را در توزیع زمان سفر به طور مؤثرتری پیش‌بینی کند.

ژو^۱ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزیابی قابلیت اطمینان سرویس اتوبوس شهری در افق‌های زمانی متغیر با استفاده از روش یادگیری عمیق ترکیبی" در مطالعه تحقیقاتی که بر روی مسیر اتوبوس در سوژو، چین انجام داده‌اند، از روش یادگیری عمیق جدیدی به نام تجزیه حالت متغیر حافظه کوتاه مدت^۲ (VMD-LSTM) استفاده کردند که سرعت سفر اتوبوس را در افق‌های زمانی متغیر با پیش‌بینی اطلاعات ورود اتوبوس، پیش‌بینی می‌کند. از الگوریتم LSTM^۳ بیشتر برای پیش‌بینی بردار (سرعت پیوند اتوبوس) استفاده می‌شود. اینجا از الگوریتم‌های مختلف به عنوان رمزنگار خودکار، به‌طور خاص VMD^۴ برای تجزیه سری‌های سرعت لینک گذرگاه خام به چندین زیرلایه استفاده می‌شود و شبکه LSTM به عنوان پیش‌بینی‌کننده هر زیرلایه پذیرفته می‌شود. این روش در مقایسه با مدل سنتی LSTM، رگرسیون خطی و SVM، که تغییرات زمانی یا مکانی را در نظر می‌گیرند، ارزیابی می‌شود. روش VMD-LSTM می‌تواند پیچیدگی محاسباتی را در مقایسه با مدل LSTM کاهش دهد، در حالی که الگوهای سرعت سفر پیوند اتوبوس مشابه را ثبت می‌کند. از دو شاخص میانگین خطای مطلق^۵ (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی سرعت سفر اتوبوس و پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوس استفاده شده است.

⁴ Variational Mode Decomposition

⁵ Mean Absolute Error

⁶ Liu

¹ Zhou

² Variational Mode Decomposition Long Short-Term Memory

³ Long Short-Term Memory



داده‌های ایستگاه‌های خطوط یزد شامل اطلاعاتی از قبیل شماره خط اتوبوس، جهت یک خط اتوبوس، شماره ایستگاه، نام ایستگاه، ترتیب یک ایستگاه در خط و طول و عرض جغرافیایی محل ایستگاه است. دو ایستگاه مجاور در یک خط به عنوان بخش در نظر گرفته شده است.

۳،۳ استخراج ویژگی

باتوجه به دو مجموعه داده GPS اتوبوس‌ها و ایستگاه‌ها، به‌ازای تمام نقاط GPS ثبت شده برای هر اتوبوس در طول هر روز، نزدیک‌ترین ایستگاه به هر نقطه GPS اتوبوس با فاصله آن به دست آمده و ذخیره می‌شود. در مرحله بعد، داده‌ها براساس شماره اتوبوس‌ها پارتیشن‌بندی می‌شوند، یعنی اطلاعات مربوط به هر اتوبوس در یک پارتیشن قرار می‌گیرند. سپس در هر پارتیشن، ایستگاه‌هایی که اتوبوس از آنها عبور کرده است، مشخص شده و به عنوان مسیری که اتوبوس طی کرده، ذخیره می‌شوند. در داده ایستگاه‌ها، ایستگاه‌های هر خط مشخص است، پس بین ایستگاه‌های همه مسیرها و ایستگاه‌های مسیری که برای هر اتوبوس به دست آمده است، اشتراک گرفته می‌شود. در نهایت، مسیری که تعداد ایستگاه مشترک بیشتری با مسیر اتوبوس دارد، به عنوان مسیر مربوط به آن اتوبوس در نظر گرفته می‌شود و به این ترتیب خط هر اتوبوس در هر روز مشخص شده است. برای ادامه کار خطوطی که تعداد اتوبوس بیشتری را دارند، انتخاب می‌شوند. خطوط ۵۹، ۵۵، ۵۱، ۱۷، ۱۱ و ۶۲ نسبت به بقیه خطوط اتوبوس بیشتری داشتند و برای بررسی انتخاب شدند.

۳،۴ محاسبه قابلیت اطمینان

سفری مطمئن است که در زمان مشخص در ایستگاه توقف کند و در مسیر خود از تمام ایستگاه‌ها بگذرد. دریک سفر مشخص (Trip)، توالی مسیر به صورت $Trip = \{s_0, s_1, \dots, s_d\}$ است، که مبدأ s_0 و مقصد آن s_d است. اولین کار محاسبه امتیاز قابلیت اطمینان هر سفر اتوبوس است. امتیاز قابلیت

پس از پیش‌پردازش داده، شماره خط برای هر اتوبوس تشخیص داده می‌شود و در ادامه قابلیت اطمینان و سرفاصله برنامه‌ریزی شده محاسبه می‌شود. در زیر بخش ۳-۵، عملکرد و پایداری سرویس اتوبوس ارزیابی می‌شود و در نهایت در بخش بعدی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان و پایداری سفر اتوبوس از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود.

۳،۱ داده

در این پژوهش از داده‌های GPS اتوبوس‌ها، داده‌های ایستگاه‌ها و مسیرهای اتوبوس شهر یزد استفاده شده است. داده‌های GPS، از تاریخ ۲۶ مهر تا ۲۳ آبان ۱۳۹۵ جمع‌آوری شده است. هر سی ثانیه یک بار اطلاعات مربوط به هر نقطه GPS تولیدی توسط دستگاه‌های GPS نصب شده روی اتوبوس‌ها ارسال می‌شوند و بدین طریق مسیر اتوبوس قابل ردیابی است.

۳،۲ پیش‌پردازش داده

ابتدا لازم است داده‌های خام GPS اتوبوس‌ها، به فرم زمان و تاریخ عادی تبدیل شود. این زمان با استفاده از کتابخانه `datetime` و تابع `utcfromtimestamp` در پایتون به تاریخ و ساعت معمولی تبدیل شده است. مجموعه داده GPS شامل داده‌های پرت نیز است. بنابراین لازم است حد آستان‌های برای زمان و سرعت نقطه‌های GPS دریافتی در نظر گرفت، اگر زمان بیشتر از سی دقیقه طول بکشد و همچنان دارای سرعت صفر باشد باید این نقطه‌های GPS دریافتی را شناسایی و از مجموعه داده حذف کرد. برای مثال زمانی که اتوبوس به مدت طولانی توقف کرده است. اینجا داده‌های GPS با بازه زمانی ۷:۰۰ تا ۲۱:۰۰ را در نظر می‌گیریم. همچنین به دلیل اینکه تعداد اتوبوس‌ها در روز جمعه خیلی کم است و فعالیتی ندارند، روز جمعه را حذف کرده و پنجشنبه به عنوان روز آخر هفته در نظر گرفته شده است.

قابلیت اطمینان برای آن ایستگاه کمتر است. هر چه عدد به دست آمده به یک نزدیکتر باشد، ایستگاه دارای امتیاز بالاتری است و قابلیت اطمینان آن نیز بیشتر است. مقدارهای مربوط به انحراف فاصله و انحراف سرعت و انحراف سرفاصله زمانی با روش نرمال‌سازی مقدار حداکثر-حداقل^۲ در بازه بسته صفر تا یک نرمال شده‌است.

قابلیت اطمینان هر سفر، با توجه به امتیاز قابلیت اطمینان ایستگاه‌های مربوط به همان سفر محاسبه می‌شود. ایستگاه‌های که اتوبوس در طی مسیر طی کرده است با توجه به رابطه (۴) محاسبه می‌شود. برای ایستگاه‌هایی که اتوبوس در طی مسیر از آنها عبور نکرده است نیز امتیاز صفر در نظر گرفته می‌شود. سپس میانگین امتیاز همه ایستگاه‌ها طبق مرجع [۵] به‌عنوان امتیاز قابلیت اطمینان هر سفر اتوبوس با توجه به رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود. که در آن n تعداد ایستگاه‌های هر سفر، از ایستگاه یک تا ایستگاه پایان است.

محاسبه قابلیت اطمینان هر خط اتوبوس، طبق رابطه (۵) برابر است با میانگین امتیاز قابلیت اطمینان سفرهای اتوبوس که انجام شده‌است. که در اینجا m تعداد سفرهای اتوبوس هر خط، از اولین سفر تا آخرین سفر است.

اطمینان نیز طبق رابطه (۳) برای هر خط محاسبه می‌شود. امتیاز قابلیت اطمینان هر ایستگاه براساس ۳ پارامتر فاصله (متر)، سرفاصله زمانی (ثانیه) و سرعت (متر بر ثانیه) مشخص می‌گردد. در نهایت انحراف این ۳ پارامتر با توجه به یک روش ترکیب خطی وزن دار^۱ محاسبه می‌گردد.

d_{dist} انحراف فاصله و d_{speed} انحراف سرعت مربوط به نزدیکترین نقطه GPS نسبت به ایستگاه s_i است و d_{time} انحراف سرفاصله زمانی است. همچنین w_{speed} وزن پارامتر سرعت، w_{dist} وزن پارامتر فاصله و w_{time} وزن پارامتر سرفاصله زمانی با مقادیر ۰/۱، ۰/۶ و ۰/۳ است. اگر اتوبوس با تأخیر به یک ایستگاه برسد و انتظار مسافر بیشتر شود بهتر از این است که از ایستگاه مورد نظر هرگز نگذرد.

ابتدا سرفاصله زمانی بین دو اتوبوس متوالی از یک خط برای هر ایستگاه (جهت به‌دست آوردن انحراف با توجه به سرفاصله زمانی) محاسبه می‌شود. سپس این مقدار از مقدار سرفاصله برنامه‌ریزی‌شده، کم می‌شود. در بهترین حالت بین نزدیکترین نقطه GPS و ایستگاه مورد نظر s_i باید صفر متر فاصله و صفر سرعت متر بر ثانیه باشد و انحراف سرفاصله زمانی نیز صفر ثانیه باشد. هر چه مجموع انحراف این سه پارامتر بیشتر باشد، امتیاز

$$score_{station} = 1 - (d_{dist} \times w_{dist} + d_{time} \times w_{time} + d_{speed} \times w_{speed}) \quad (3)$$

$$score_{Trip} = \frac{1}{|n|} - \sum_{station=1}^{|n|} score_{station} \quad (4)$$

$$score_{line} = \frac{1}{|m|} - \sum_{Trip=1}^{|m|} score_{Trip} \quad (5)$$

مقایسات براساس تعداد سفر، میانگین، انحراف معیار، کمترین و بیشترین مقدار و

امتیاز قابلیت اطمینان خطوط ۱۷، ۱۱، ۵۹، ۵۵، ۵۱ و ۶۲ شهر یزد در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

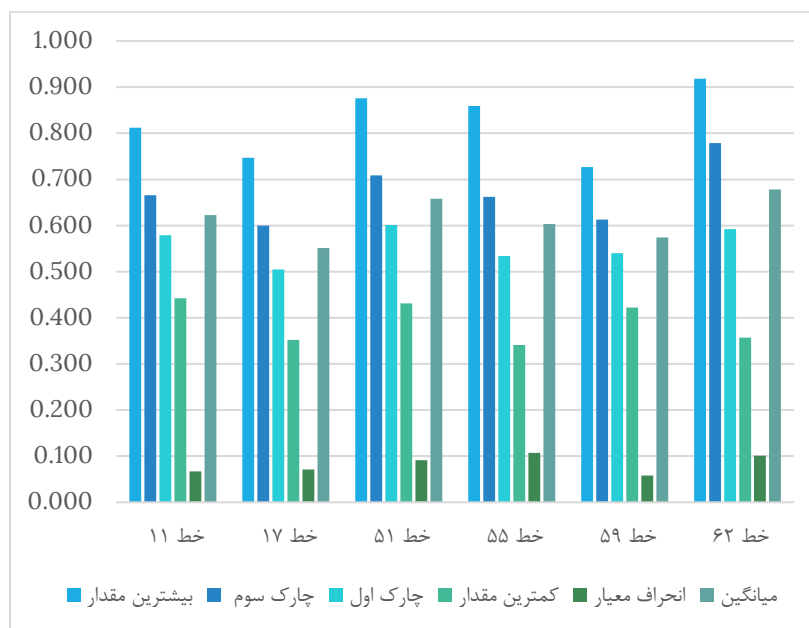
² Min-Max Normalization

¹ Linear Weighted Combination

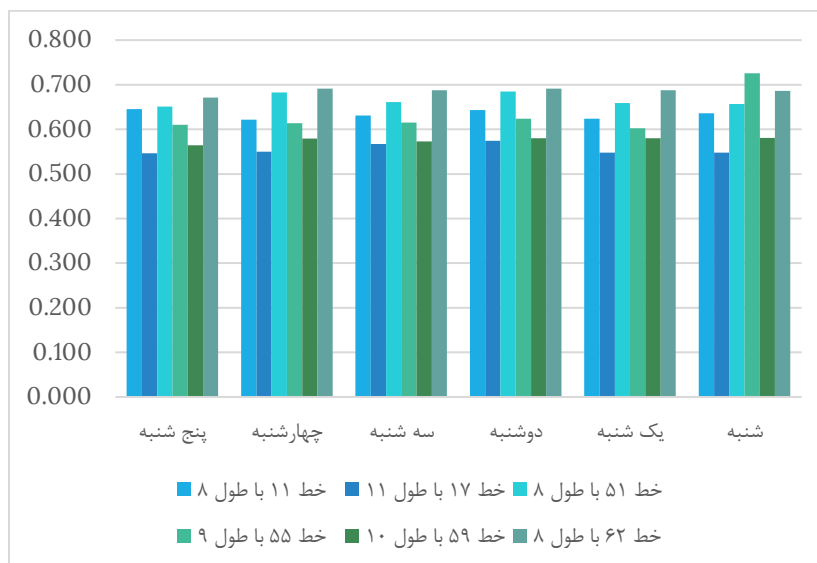


شده است. رابطه امتیاز قابلیت اطمینان و طول خط به صورت معکوس است، اگر طول مسیر افزایش یابد، امتیاز قابلیت اطمینان کاهش می یابد.

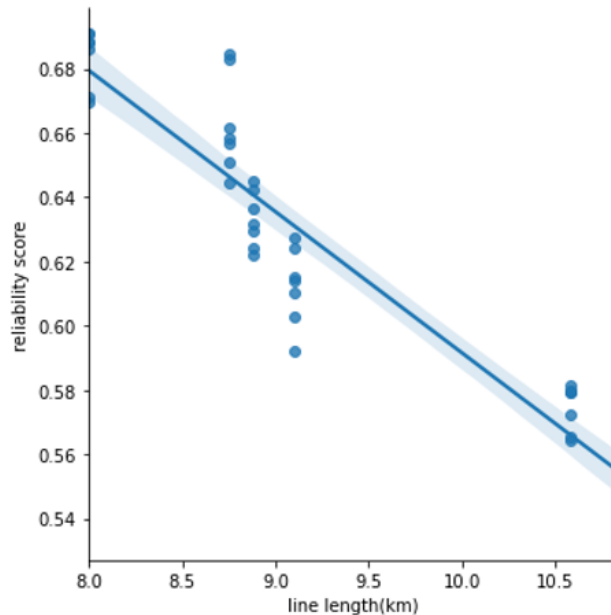
همچنین چارک اول و سوم است. همچنین امتیاز قابلیت اطمینان همین خطوط در روزهای هفته در شکل ۲ نشان داده شده است. رابطه امتیاز قابلیت اطمینان و طول خط در شکل ۳ نشان داده



شکل ۱- مقایسه امتیاز قابلیت اطمینان خط‌های اتوبوس



شکل ۲- امتیاز قابلیت اطمینان خط‌های اتوبوس در روزهای هفته



شکل ۳ - رابطه امتیاز قابلیت اطمینان و طول خط

سفرهای اتوبوس در طول روز به دست می‌آید. سپس ویژگی‌های زمان توقف، زمان سفر بخش، سرفاصله و انحراف از سرفاصله برای اتوبوس‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به ویژگی‌های استخراج شده، وضعیت حرکت دسته‌ای و میانگین انحراف سرفاصله بررسی می‌شوند. براساس وضعیت حرکت دسته‌ای و میانگین انحراف سرفاصله در ایستگاه‌ها می‌توان شرایط پایداری را بررسی کرد، زیرا حرکت دسته‌ای، با توجه به سرفاصله‌های کمتر از یک دقیقه محاسبه شده که نشان‌دهنده سرفاصله‌های نامنظم است و میانگین انحراف سرفاصله، انحراف سرفاصله مشاهده شده از سرفاصله واقعی را نشان می‌دهد و مقادیر کم آن به معنی پایداری بیشتر است. در آخر، بردار ویژگی مورد نیاز برای قسمت پیش‌بینی سرفاصله تعیین شده و پیش‌بینی انجام می‌شود.

الف- زمان سفر بخش

توزیع و انحراف مجموعه داده‌های زمان سفر بخش در یک ماه، در شکل ۴ نشان داده شده است. خطوط ۱۷،۱۱ و ۵۹ دارای توزیع مثبت و انحراف به سمت راست هستند و در این خطوط زمان سفر

۳/۵ ارزیابی عملکرد و پایداری سرویس اتوبوس

در این قسمت ارزیابی عملکرد مسیر اتوبوس انجام شده است. همچنین پارامترهای تأثیرگذار بر حرکت دسته‌ای و پایداری، با توجه به زمان سفر بخش، زمان توقف و سرفاصله بررسی شده است.

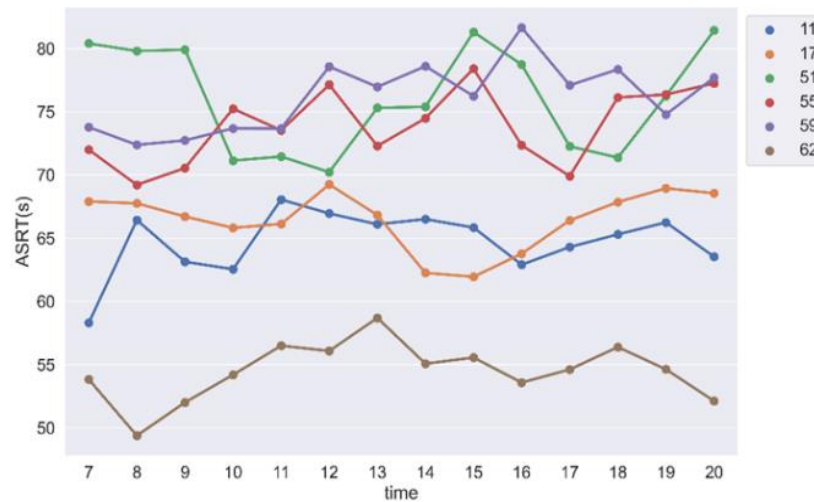
برنامه‌ریزان شهری در تلاش هستند تا کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی را به منظور جذب مسافران بیشتر و کاهش هزینه‌های عملیاتی بهبود بخشند. برای دستیابی به این هدف، نظم سرفاصله اتوبوس باید تا حد ممکن برنامه‌ریزی شود. سرفاصله نامنظم اتوبوس، ممکن است منجر به اتفاق افتادن حرکت دسته‌ای و افزایش زمان انتظار مسافران شود، زمان انتظار مسافران عامل تأثیرگذار بر نگرش مسافران است. بنابراین ارزیابی عملکرد سرویس اتوبوس و پایداری ایستگاه‌ها و پیش‌بینی سرفاصله اتوبوس برای اتوبوس‌رانی و برنامه‌ریزان شهری از اهمیت زیادی برخوردار است.

در ابتدا با استفاده از مجموعه داده‌های ایستگاه‌های خطوط اتوبوس و داده‌های GPS اتوبوس‌ها،



میانگین زمان سفر بخش (ASRT) از ساعت ۷:۰۰ تا ۲۱:۰۰ در طول روز، از ۲۶ مهر تا ۲۳ آبان ۱۳۹۵ برای همه خطوط در شکل ۵ رسم شده است. هر خط در دوره‌های زمانی مختلف روز مقادیر متفاوتی دارد.

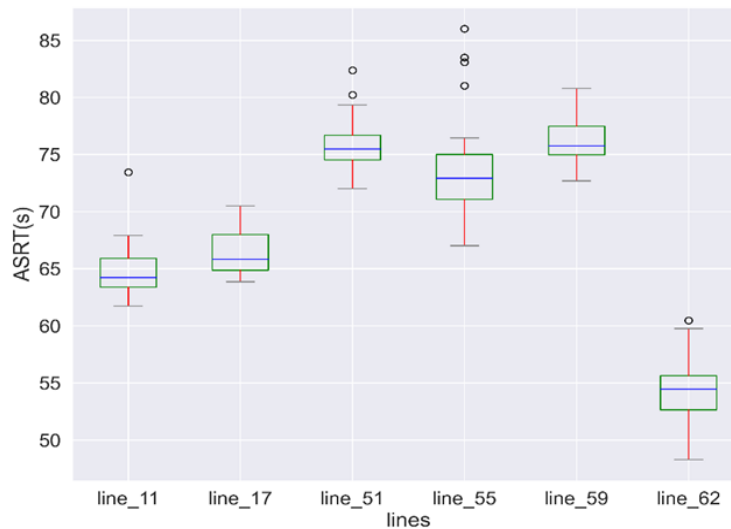
بخش و ترافیک، در بیشتر بخش‌ها زیاد است. خطوط ۶۲ و ۵۵ دارای توزیع منفی و انحراف به سمت چپ هستند. خط ۵۱ نیز دارای توزیع نرمال است.



شکل ۴- توزیع و انحراف داده‌های زمان سفر بخش خط‌های ۱۱، ۱۷، ۵۱، ۵۵، ۵۹ و ۶۲

در روز می‌رسند، که نشان دهنده آن است که در این زمان‌ها شرایط ترافیک از سایر دوره‌ها بیشتر است.

خطوط ۵۵، ۵۱ و ۵۹ از ساعت ۱۵:۰۰ تا، ۱۶:۰۰ خطوط ۱۱ و ۱۷ از ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۲:۰۰ و خط ۶۲ در ساعت ۱۳:۰۰ به مقادیر بالاتری از میانگین زمان سفر بخش



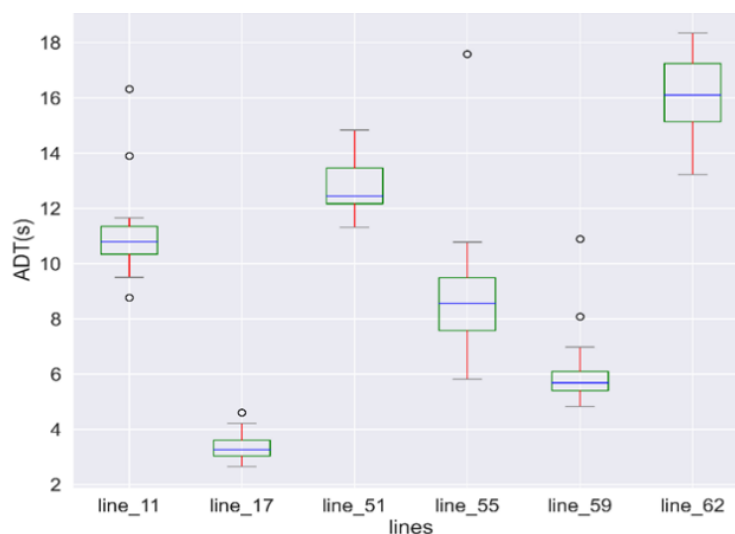
شکل ۵- میانگین زمان سفر بخش خط‌های ۱۱، ۱۷، ۵۱، ۵۵، ۵۹ و ۶۲

انحراف به سمت چپ هستند و در این خطوط زمان توقف و تعداد مسافران، در ایستگاه‌ها کم است.

میانگین زمان توقف (ADT) از ساعت ۷:۰۰ تا ۲۱:۰۰ در طول روز برای یک ماه از ۲۶ مهر تا ۲۳ آبان ۱۳۹۵ در شکل ۷ رسم شده است.

ب- زمان توقف

در شکل ۶ توزیع و انحراف مجموعه داده‌های زمان توقف، در یک ماه نشان داده شده است. خطوط ۵۹، ۱۷ دارای توزیع مثبت و انحراف به سمت راست هستند. خطوط ۵۵، ۱۱ و ۶۲ دارای توزیع منفی و

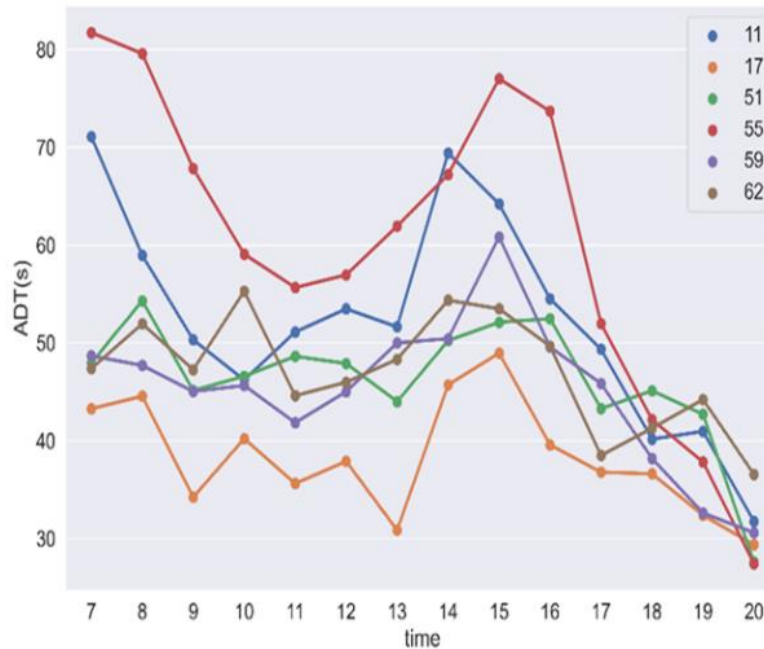


شکل ۶- توزیع و انحراف داده‌های زمان توقف خط‌های ۱۱، ۱۷، ۵۱، ۵۵، ۵۹ و ۶۲



زیاد است، تعداد زیاد مسافران است. از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۱:۰۰ و ۱۶:۰۰ تا ۲۰:۰۰ در اکثر خطوط، مقادیر میانگین زمان توقف کاهش می‌یابد و در ساعت ۲۰:۰۰ میانگین زمان توقف کمترین مقدار را دارد.

مقادیر میانگین زمان توقف برای اکثر خطوط در ساعت ۷:۰۰ صبح و از ساعت ۱۴:۰۰ تا ۱۶:۰۰ عصر زیاد است. به عنوان مثال مقدار ADT خط ۱۱ در ساعت ۷:۰۰ صبح ۷۱ ثانیه و در ساعت ۱۴:۰۰ عصر ۷۰ ثانیه است. دلیل اینکه در این ساعات‌های روز زمان توقف

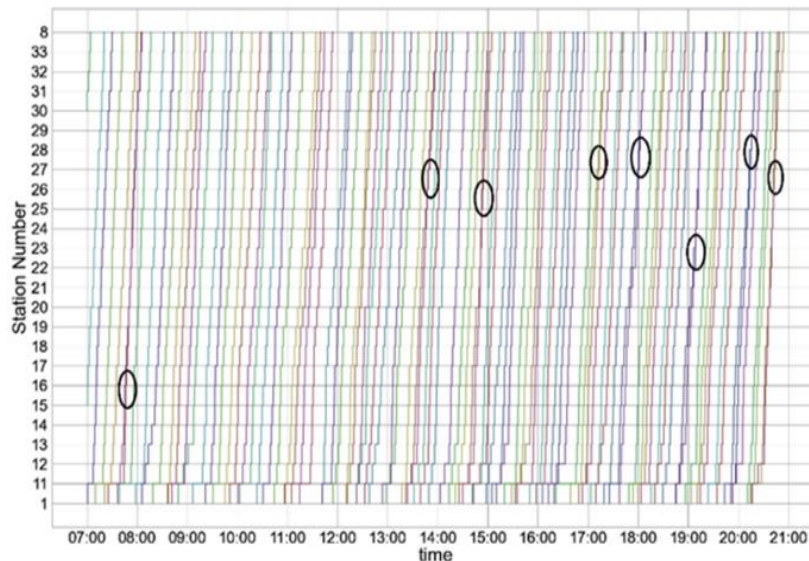


شکل ۷- میانگین زمان توقف خط‌های ۱۱، ۱۷، ۵۱، ۵۵، ۵۹ و ۶۲

باعث ایجاد حرکت دسته‌ای می‌شوند باید شناسایی گردد. نمودار زمان-مکان مسیر ۱۱ در ۱۸ آبان ۱۳۹۵ براساس داده‌های زمان رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه‌های خط در شکل ۸ نشان داده شده‌است.

پ- حرکت دسته‌ای

یکی از اهداف این پژوهش کاهش حرکت دسته‌ای است. به منظور کاهش حرکت دسته‌ای، نقاطی که



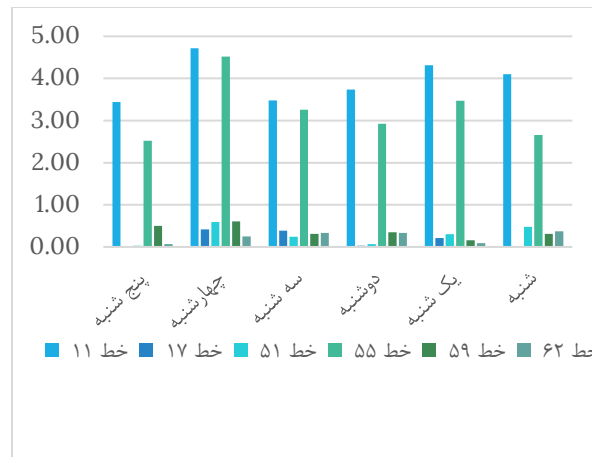
شکل ۸- نمودار زمان-مکان خط ۱۱ در ۱۸ آبان ۱۳۹۵

تحلیل می‌گردد، شرایطی که اتوبوس‌ها تقریباً به صورت همزمان می‌رسند (ایلیوپولوا^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). آستانه سرفاصله با مقادیر ۶، ۳۰ و ۶۰ ثانیه تنظیم می‌شود. هرچه مقدار آستانه بیشتر شود، ایستگاه‌های بیشتری حرکت دسته‌ای دارند، پس مقدار آستانه برای سرفاصله ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ درصد حرکت دسته‌ای برای شش مسیر در روزهای هفته، نمایش داده شده است، مطابق شکل ۹ شرایط حرکت دسته‌ای در خط ۱۱ بدتر از بقیه خطوط است. همچنین همه خطوط به جز خط ۵۹، شرایط حرکت دسته‌ای بهتری در آخر هفته نسبت به روزهای هفته دارند.

در نقاط مشخص شده، فاصله زمانی رسیدن دو اتوبوس به ایستگاه خیلی کم است، در واقع زمانی که سرفاصله بین دو اتوبوس کم است، احتمال اینکه حرکت دسته‌ای رخ دهد زیاد است. اکثر نقاط حرکت دسته‌ای در ظهر، عصر و شب متمرکز هستند، زمانی که شلوغ است و تعداد زیادی اتوبوس ارسال می‌شود. برنامه‌ریزان شهری باید به این زمان‌ها توجه بیشتری نمایند.

اینجا از یک آستانه مبتنی بر سرفاصله جهت تحلیل وضعیت حرکت دسته‌ای خطوط استفاده گردید. مهم‌ترین موارد حرکت دسته‌ای از این طریق

¹ Iliopoulou

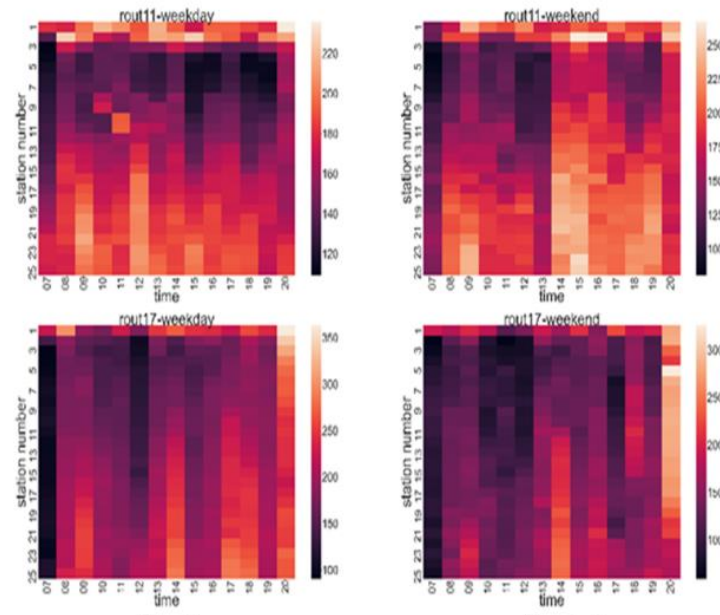


شکل ۹- درصد حرکت دسته‌ای برای شش مسیر در روزهای هفته

هفته از ساعت ۱۴:۰۰ تا ۱۶:۰۰ میانگین انحراف سرفاصله همه ایستگاه‌ها زیاد است. میانگین انحراف سرفاصله ایستگاه‌های انتهای مسیر خط ۱۷ در ساعت‌های ۱۴:۰۰، ۱۷:۰۰، ۱۸:۰۰ و ۱۹:۰۰ در هفته، مقدار بیشتری دارد. میانگین انحراف سرفاصله ایستگاه شروع مسیرها در بیشتر ساعات روزهای هفته زیاد است. ایستگاه‌های انتهای مسیر، انحراف سرفاصله بیشتر و پایداری کمتری دارند. همچنین پایداری بیشتری در ساعات اولیه روز نسبت به ساعات پایانی روز مشاهده می‌شود، برای مثال، خط ۱۱ از صبح تا ظهر در روزهای آخر هفته، پایداریتر است.

ت- انحراف سرفاصله

برای برای تحلیل و بررسی پایداری ایستگاه‌ها در مسیرها، میانگین انحراف سرفاصله عامل مهمی است. انحراف سرفاصله کمتر به معنی پایداری بیشتر است. شکل ۱۰، میانگین انحراف سرفاصله ایستگاه‌های خطوط ۱۱ و ۱۷ در طول روز برای روزهای هفته را نشان می‌دهد. میانگین انحراف سرفاصله در بیشتر ایستگاه‌های خط ۱۱ زیاد است و بنابراین خط ۱۱ پایداری کمتری نسبت به خط ۱۷ دارد. همچنین مستقل از ساعت در روزهای هفته، هرچه به پایان مسیر نزدیک‌تر می‌شوند، میانگین انحراف سرفاصله بیشتر می‌شود. در روزهای آخر



شکل ۱۰ - میانگین انحراف سرفاصله مسیرهای ۱۱ و ۱۷ در روزهای هفته و آخر هفته

ایستگاه‌های خطوط را استخراج کرده و به داده‌های به‌دست آمده در مراحل قبل اضافه می‌کنیم. سپس با توجه به مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها، فاصله بین ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود.

مقادیر ضریب همبستگی بین دو متغیر فاصله بین ایستگاه‌ها و میانگین انحراف سرفاصله، برای شش خط در جدول ۱ آورده شده‌است، مشاهده می‌شود که به ترتیب خط ۱۱، ۶۲ و ۵۵ همبستگی مستقیم کمی دارند و با افزایش فاصله بین ایستگاه، میانگین انحراف سرفاصله زیاد شده و پایداری کم می‌شود. خط ۵۱ نیز همبستگی معکوس کمی دارد، با افزایش فاصله بین ایستگاه، مقدار میانگین انحراف سرفاصله کم می‌شود.

ث- بررسی رابطه میانگین انحراف سرفاصله و شاخص‌های مسیر

رابطه آماری بین دو متغیر به عنوان همبستگی^۱ آنها نامیده می‌شود. برای درک بهتر همبستگی بین دو متغیر از ضریب پیرسون^۲ استفاده می‌شود. ضریب همبستگی پیرسون برای نشان دادن قدرت رابطه خطی بین دو نمونه داده استفاده می‌شود. طول مسیر و زمان سفر بخش به عنوان شاخص‌های مسیر در نظر گرفته می‌شوند. برای درک رابطه بین طول مسیر و میانگین انحراف سرفاصله، نیاز به محاسبه فاصله بین ایستگاه‌ها است، منظور از طول مسیر، فاصله بین هر دو ایستگاه است. با در اختیار داشتن داده ایستگاه‌ها، مختصات جغرافیایی

² Pearson Correlation Coefficient

¹ Correlation



جدول ۱- مقادیر ضریب همبستگی بین دو متغیر فاصله بین ایستگاه‌ها و میانگین انحراف سرفاصله

| شماره خط | ضریب پیرسون |
|----------|-------------|
| ۱۱ | ۰٫۲۹۷ |
| ۱۷ | -۰٫۰۵۵ |
| ۵۱ | -۰٫۳۵۳ |
| ۵۵ | ۰٫۲۲۶ |
| ۵۹ | ۰٫۱۴۶ |
| ۶۲ | ۰٫۴۴۵ |

همانطور که مشاهده می‌شود، به ترتیب خط ۶۲ و ۵۹ همبستگی مستقیم بیشتری نسبت به بقیه خطوط دارند، با افزایش زمان سفر بخش در این خطوط، پایداری کم می‌شود.

در مورد رابطه زمان سفر بخش و میانگین انحراف سرفاصله، انتظار داریم هرچه زمان سفر بخش افزایش می‌یابد، پایداری کم شود. ضرایب همبستگی پیرسون بین این دو متغیر برای شش خط، محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر ضریب همبستگی بین دو متغیر زمان سفر بخش و میانگین انحراف سرفاصله

| شماره خط | ضریب پیرسون |
|----------|-------------|
| ۱۱ | ۰٫۰۱۴ |
| ۱۷ | -۰٫۱۶۸ |
| ۵۱ | -۰٫۰۲۱ |
| ۵۵ | ۰٫۱۰۵ |
| ۵۹ | ۰٫۳۴۱ |
| ۶۲ | ۰٫۵۲۱ |

۴٫۱ پیش‌بینی قابلیت اطمینان سفر اتوبوس

هدف در اینجا پیش‌بینی قابلیت اطمینان آینده سفر اتوبوس است که برای مسافر و عملکرد اتوبوس مهم است. مجموعه داده مربوط به خط ۱۱ شهر یزد برای پیش‌بینی در نظر گرفته شده است.

هایپرپارامترهای استفاده شده جهت پیش‌بینی قابلیت اطمینان سفر در جدول ۳ آورده شده است. برای محدود کردن مقادیر پارامترها، روش جستجوی تصادفی^۶ با اعتبارسنجی متقابل^۷ استفاده شده است. سپس برای بهینه‌سازی مدل، جستجوی

۴ نتایج

در این پژوهش برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سفر اتوبوس و سرفاصله، از مدل‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده^۱ استفاده شده است. مدل‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده بررسی شده در اینجا جهت پیش‌بینی، شامل رگرسیون خطی^۲، رگرسیون بردار پشتیبان^۳، رگرسیون تقویت‌شده^۴ گرادیان^۴ (GBR) و رگرسیون جنگل تصادفی^۵ است.

⁵ Random Forest Regression

⁶ Random Search

⁷ Cross Validation

¹ Supervised Learning algorithm

² Linear Regression

³ Support Vector Regression

⁴ Gradient Boosting Regression



شبک‌های^۱ همراه با اعتبارسنجی متقابل به کار گرفته شده‌است.

جدول ۳- هایپرپارامترهای استفاده شده جهت پیش‌بینی قابلیت اطمینان

| رگرسیون بردار پشتیبان | رگرسیون جنگل تصادفی | رگرسیون تقویت‌شده گرادیان |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| - | Bootsrap=True | Loss=lad |
| C: 100 | max_depth=40 | max_depth= 7 |
| Gamma=0.1 | max_features=8 | max_features=9 |
| Kernel: RBF | n_estimators =300 | n_estimators=380 |
| Epsilon= 0.2 | min_samples_leaf =3 | min_samples_leaf=7 |
| - | min_samples_split=7 | min_samples_split=8 |

هایپرپارامترهای تنظیم‌شده برای مدل‌های یادگیری ماشین در جدول ۴ بیان شده‌است. برای محدود کردن مقادیر پارامترها، روش جستجوی تصادفی با اعتبارسنجی متقابل استفاده شده‌است. سپس برای بهینه‌سازی مدل، جستجوی شبکه‌ای همراه با اعتبارسنجی متقابل به کار گرفته شده‌است.

۴٫۲ پیش‌بینی سرفاصله

ورودی‌ها جهت پیش‌بینی سرفاصله در ایستگاه بعدی شامل زمان سفربخش، سرفاصله در ایستگاه قبلی، زمان توقف، روزهای هفته، شماره ایستگاه، زمان در طول روز و شماره اتوبوس است.

جدول ۴- هایپرپارامترهای استفاده شده جهت پیش‌بینی سرفاصله

| رگرسیون بردار پشتیبان | رگرسیون جنگل تصادفی | رگرسیون تقویت‌شده گرادیان |
|-----------------------|----------------------|---------------------------|
| C= 1000 | max_depth=50 | max_depth= 7 |
| Gamma= 1 | max_features : 5 | max_features= None |
| Kernel=RBF | n_estimators : 600 | n_estimators= 200 |
| Epsilon= 0.2 | min_samples_leaf =4 | min_samples_leaf=10 |
| - | min_samples_split= 2 | min_samples_split =4 |

رگرسیون توسط سه پارامتر میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و درصد میانگین قدرمطلق خطا (MAPE) و درصد میانگین قدرمطلق متقارن خطا^۲ (SMAPE) با داشتن مقادیر هدف واقعی در مجموعه داده‌های آزمون و مقادیر هدف پیش‌بینی‌شده، ارزیابی شده‌اند.

الف- میانگین قدرمطلق خطا (MAE)

۵ بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش ارزیابی دقت پیش‌بینی انجام می‌شود.

۵٫۱ معیارهای ارزیابی عملکرد الگوریتم-

های یادگیری ماشین رگرسیون

پیش‌بینی بر روی هر متغیری، در اثر عوامل مختلف ممکن است با خطا همراه باشد، که در نتیجه آن پیش‌بینی دقیق نیست. عملکرد پیش‌بینی مدل‌های

^۲ Symmetric Mean Absolute Percentage Error

^۱ Grid Search



درصد میانگین قدر مطلق متقارن خطا دارای دامنه عملکردی بین ۰٪ تا ۲۰۰٪ است. به دلیل داشتن مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده هرگز نمی‌تواند مقداری بیشتر از ۲۰۰٪ داشته باشد. بنابراین مدل با مقدار نزدیک به صفر بهتر است.

۵٫۲ ارزیابی عملکرد مدل‌های

پیشنهادی جهت پیش‌بینی قابلیت اطمینان

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی جهت پیش‌بینی قابلیت اطمینان از دو معیار MAE و MAPE استفاده شده‌است. مقایسه عملکرد این دو معیار در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. با توجه به مقادیر MAPE و MAE، رگرسیون تقویت‌شده گرادیان بهترین عملکرد را دارد. همچنین رگرسیون خطی مقادیر MAPE و MAE بیشتری دارد و در نتیجه عملکرد بدتری را در بین بقیه روش‌ها دارد.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \quad (۷)$$

$$SMAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{(|x_i| + |y_i|)/2} \quad (۸)$$

میانگین قدرمطلق خطا از فاصله بین مقدار پیش‌بینی شده و واقعی استفاده می‌کند و طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در محاسبه این خطا، فقط میزان فاصله و نه جهت فاصله استفاده می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_i - x_i| \quad (۶)$$

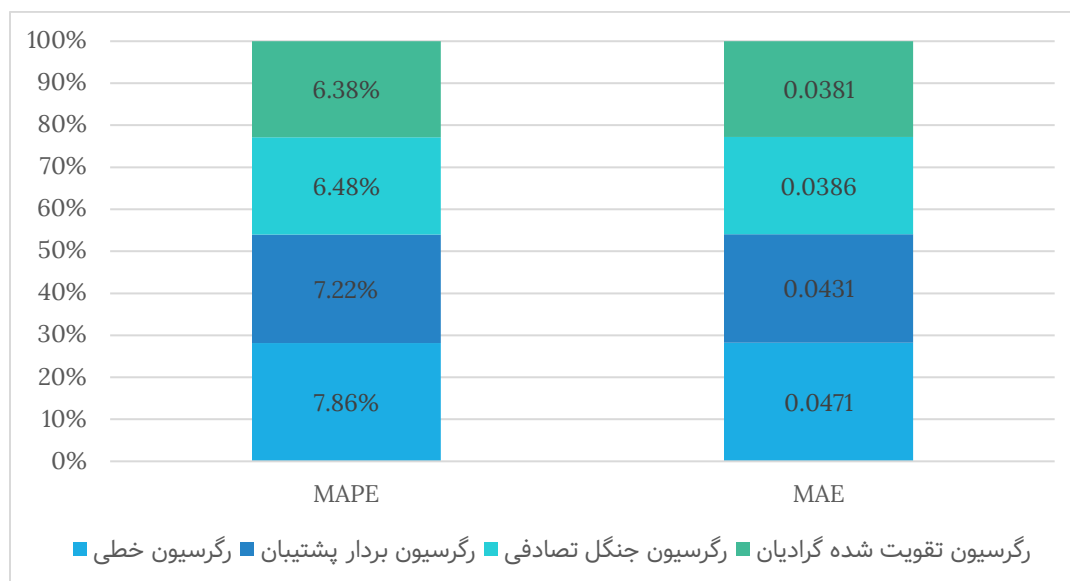
که در آن y_i مقدار واقعی و x_i مقدار پیش‌بینی شده‌است.

ب- درصد میانگین قدرمطلق خطا (MAPE)

درصد میانگین قدرمطلق خطا معیاری است که معمولاً در پیش‌بینی استفاده می‌شود. هرچه MAPE کوچکتر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری خواهد داشت. MAPE طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود، که در آن n تعداد داده‌ها است.

پ- درصد میانگین قدرمطلق متقارن خطا (SMAPE)

برای اندازه‌گیری دقت بر اساس درصد خطاهای مجموعه داده از درصد میانگین قدرمطلق متقارن خطا مطابق رابطه (۸) استفاده می‌شود.

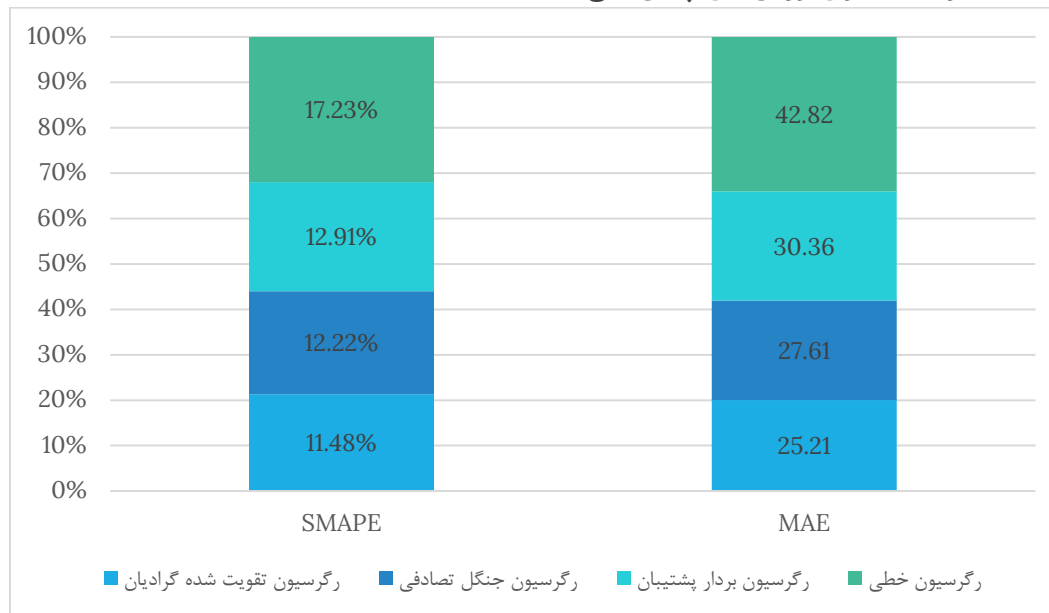


شکل ۱۱- مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادی

ارائه شده با توجه به سرفاصله ایستگاه‌های قبل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کمترین خطا مربوط به مدل رگرسیون تقویت شده گرادیان است و عملکرد بهتری نسبت به بقیه روش‌ها داشته است.

۵٫۳ ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی جهت پیش‌بینی سرفاصله

خط ۵۲، ۱۱ ایستگاه دارد، خط‌های محاسبه شده براساس MAE و SMAPE برای روش‌های پیش‌بینی



شکل ۱۲- ارزیابی عملکرد پیش‌بینی سرفاصله در مدل‌های رگرسیون

پایداری ایستگاه‌ها محاسبه شده و سپس وضعیت پارامترهای مؤثر بر حرکت دسته‌ای و پایداری خط و ایستگاه‌ها بررسی شده است. امتیاز قابلیت اطمینان با افزایش طول مسیر، کاهش پیدا می‌کند. عوامل زیادی مانند: تقاضای مسافر، شرایط ترافیک خیابان، ظرفیت اتوبوس، زمان توقف و زمان سفر بخش، به از بین رفتن نظم سرفاصله و وقوع حرکت دسته‌ای کمک می‌کنند. افزایش یا کاهش زمان توقف و زمان سفر بخش می‌تواند، نظم سرفاصله را از بین ببرد. براساس تحلیل‌های صورت گرفته، زمان توقف در اکثر ایستگاه‌ها نوسان ندارد و در محدوده ۵ تا ۲۰ ثانیه است. همچنین مقادیر میانگین زمان توقف خط‌ها در بازه‌های زمانی مختلف روز، به دلیل تعداد مسافران متفاوت است. تنوع زیاد در زمان سفر

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی سرفاصله، تحلیل و آنالیز عملکرد سرویس اتوبوس‌های شهری و پایداری ایستگاه‌ها در سال‌های اخیر به یکی از نقاط مهم تبدیل شده است. در این پژوهش از داده‌های GPS اتوبوس‌ها و ایستگاه‌های خطوط اتوبوس شهر یزد استفاده شده است. محاسبه امتیاز قابلیت اطمینان برای هر ایستگاه و مسیر سفر اتوبوس و هر خطی با یک روش ترکیب خطی وزن‌دار انجام شد. برای ارزیابی پایداری و قابلیت اطمینان از ۶ خط اتوبوس شهر یزد، و همچنین از یک خط برای پیش‌بینی سرفاصله خط و قابلیت اطمینان سفر اتوبوس استفاده شده است. شاخص‌های لازم برای ارزیابی عملکرد سرویس اتوبوس‌های شهری، قابلیت اطمینان سفر اتوبوس و



ماتیاس و همکاران، ۲۰۱۶) و (گو و همکاران، ۲۰۲۱) با توجه به معیار ارزیابی MAE آورده شده است. در این مقاله‌ها به ترتیب، الگوریتم‌های SVR و AOSVM بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی سرفاصله داشته‌اند. در این پژوهش نیز الگوریتم رگرسیون تقویت‌شده گرادیان بهترین عملکرد را با دقت ۱۵/۲۹ ثانیه، برای پیش‌بینی سرفاصله داشته است، که نسبت به این دو مقاله، دقت بهبود داده شده است. همچنین در جدول ۶، نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان سرویس اتوبوس مربوط به مقاله‌های مرجع (سان و همکاران، ۲۰۱۷) و (گو و همکاران، ۲۰۲۱) در سه زمان مختلف با توجه به معیار ارزیابی MAPE آورده شده است. در مقاله‌های (سان و همکاران، ۲۰۱۷) و (گو و همکاران، ۲۰۲۱) به ترتیب از روش جنگل تصادفی و روش AOSVM استفاده شده است. در این پژوهش، مدل تقویت‌شده گرادیان با دقت ۶/۳۸٪ بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سفر دارا بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت روش تقویت‌شده گرادیان بسیار نزدیک به نتایج این دو مقاله است.

بخش در ایستگاه‌های برخی از بخش‌ها، دلالت بر این دارد که این بخش‌ها، بخش اصلی هستند.

همچنین مقادیر میانگین زمان سفر بخش خط‌ها در بازه‌های زمانی مختلف روز به دلیل شرایط ترافیکی خیابان متفاوت است. با توجه به شرایط حرکت دسته‌ای و میانگین انحراف سرفاصله در سطح ایستگاه‌ها، وضعیت پایداری خط و ایستگاه‌ها بررسی شده است. براساس نمودار زمان-مکان سرفاصله، بیشتر نقاط حرکت دسته‌ای از ظهر تا شب زمانی که شلوغ است و اتوبوس‌های زیادی ارسال می‌گردد، رخ می‌دهند. پایداری ایستگاه‌های انت‌هایی مسیر کمتر است و در ساعت‌های اولیه روز پایداری بیشتر است. برای پایداری مؤثر سرفاصله، برنامه‌ریزان شهری باید به این زمان‌ها و ایستگاه‌ها توجه بیشتری نمایند و اقدامات لازم، با توجه به سرفاصله، را برای جلوگیری از حرکت دسته‌ای انجام دهند. ازین‌رو پیش‌بینی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین رگرسیون بانظارت به‌کار گرفته شده است که مدل رگرسیون تقویت‌شده گرادیان عملکرد بهتری را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است.

در جدول ۵، نتایج پیش‌بینی سرفاصله این پژوهش نسبت به نتایج مقاله‌های مرجع (موریرا-



جدول ۵- نتایج پیش‌بینی سرفاصله مقاله‌های مرجع (موریرا-ماتياس و همکاران، ۲۰۱۶) و (گو و همکاران، ۲۰۲۱) و روش پیشنهادی

| سال | روش | MAE |
|------|-------|-------|
| ۲۰۱۶ | SVR | ۲۴/۷۱ |
| ۲۰۲۱ | AOSVM | ۲۸/۵ |
| ۲۰۲۳ | GBR | ۱۵/۲۹ |

جدول ۶- نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان مقاله‌های مرجع (سان و همکاران، ۲۰۱۷) و (گو و همکاران، ۲۰۲۱) و روش پیشنهادی

| سال | روش | MAPE | | |
|------|-------|-------|-------|-------|
| ۲۰۱۷ | RF | ٪۵/۷۰ | ٪۸/۳۴ | ٪۶/۳۹ |
| ۲۰۲۱ | AOSVM | ٪۶/۲۹ | ٪۵/۲۴ | ٪۸/۹۴ |
| ۲۰۲۳ | GBR | ٪۷/۱۰ | ٪۷/۵۳ | ٪۶/۳۸ |

پیشنهادها

تعداد مسافران را ایجاد کند. جهت پیش‌بینی قابلیت اطمینان آینده سفر اتوبوس پیشنهاد می‌شود که اطلاعات آب‌وهوا و شرایط ترافیکی نیز به‌عنوان ورودی‌های بردار ویژگی استفاده شود. پیش‌بینی سرفاصله نیز می‌تواند، با توجه به داده‌های کارت هوشمند و GPS انجام شود. برای پیش‌بینی سرفاصله نیز پیشنهاد می‌شود، از دیگر تکنیک‌های یادگیری ماشین استفاده کرد. همچنین می‌توان برای قسمت پیش‌بینی، الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند LSTM که نوعی شبکه عصبی بازگشتی است را در نظر گرفت. شبکه عصبی LSTM دارای حافظه طولانی کوتاه مدت است که می‌تواند توالی‌های طولانی را یاد بگیرد و به خاطر بسپارد.

هر اتوبوس دارای محدودیت ظرفیت است و هر ایستگاه با الگوهای مختلف ورود مسافران همراه است، بنابراین تأثیر الگوهای مختلف ورود مسافران در وقوع حرکت دسته‌ای را می‌توان بررسی کرد. همچنین حرکت دسته‌ای باعث افزایش زمان انتظار مسافران و از بین رفتن ظرفیت اتوبوس می‌شود. از این رو در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود، که تقاضای مسافر در ایستگاه‌ها و زمان انتظار مسافران برای ارزیابی بهتر عملکرد سیستم حمل‌ونقل عمومی در نظر گرفته شود. برای این منظور، داده‌های GPS را می‌توان با داده‌های کارت هوشمند ادغام کرد تا برآورد دقیقی از زمان سوار و پیاده شدن مسافران و



منابع

- An, Shi., Zhang, Xinming., & Wang, Jian. (2015). Finding causes of irregular headways integrating data mining and AHP. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 (4) 2604-2618.
- Andres, Matthias., & Nair, Rahul. (2017). A predictive-control framework to address bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 123-148.
- Bates, John., Polak, John., Jones, Peter., & Cook, Andrew. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3), 191-229.
- Gu, Xiaoning., Chen, Chao., Yang, Yunong., Miao, Xingzhi., & Yao, Baozhen. (2021). Reliability prediction of further transit service based on support vector machine. *Measurement and Control*, 54(5-6), 845-855.
- Huang, Y. P., Chen, C., Su, Z. C., Chen, T. S., Sumalee, A., Pan, T. L., & Zhong, R. X. (2021). Bus arrival time prediction and reliability analysis: An experimental comparison of functional data analysis and Bayesian support vector regression. *Applied Soft Computing*, 111, 107663.
- Iliopoulou, Christina A., Milioti, Christina P., Vlahogianni, Eleni I., & Kepaptsoglou, Konstantinos L. (2020). Identifying spatio-temporal patterns of bus bunching in urban networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 365-382.
- Jeong, R., & Rilett, R. (2004). Bus arrival time prediction using artificial neural network model. In *Proceedings. The 7th international IEEE conference on intelligent transportation systems (IEEE Cat. No. 04TH8749)* (pp. 988-993). IEEE.
- Liu, Yanjun., Zhang, Hui., Jia, Jianmin., Shi, Baiying., & Wang, Wei. (2023). Understanding urban bus travel time: Statistical analysis and a deep learning prediction. *International Journal of Modern Physics B*, 37(04), 2350034.
- Liu, Ronghui., & Sinha, Shalini. (2007). Modelling urban bus service and passenger reliability.
- Lin, Yongjie., Yang, Xianfeng., Zou, Nan., & Jia, Lei. (2013). Real-time bus arrival time prediction: case study for Jinan, China. *Journal of Transportation Engineering*, 139(11), 1133-1140.
- Ma, Zhenliang., Zhu, Sicong., Koutsopoulos, Haris N., & Ferreira, Luis. (2017). Quantile regression analysis of transit travel time reliability with automatic vehicle location and farecard data. *Transportation Research Record*, 2652(1), 19-29.
- Mohamed, Ahmed Hassan., Adwan, Ibrhim Al., Ahmeda, Abobaker GF., Hrtemih, Hamza., & Al-MSari, Haitham. (2021). Identification of affecting factors on the travel time reliability for bus transportation. *Knowledge-Based Engineering and Sciences*, 2(1), 19-30.
- Moreira-Matias, Luís., Cats, Oded., Gama, João., Mendes-Moreira, João., & De Sousa, Jorge Freire. (2016). An online learning approach to eliminate Bus Bunching in real-time. *Applied Soft Computing*, 47, 460-482.
- Polus, Avishai. (1978). Modeling and measurements of bus service



- reliability. *Transportation Research*, 12(4), 253-256.
- Ricard, Léa., Desaulniers, Guy., Lodi, Andrea., & Rousseau, Louis-Martin. (2022). Predicting the probability distribution of bus travel time to measure the reliability of public transport services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 138, 103619.
- Sun, Yao., Yan, Qianqian., Jiang, Yonglei., & Zhu, X. F. (2017). Reliability prediction model of further bus service based on random forest. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, 11(4), 327-335.
- Verbich, David., Diab, Ehab., & El-Geneidy, Ahmed. (2016). Have they bunched yet? An exploratory study of the impacts of bus bunching on dwell and running times. *Public Transport*, 8, 225-242.
- Wang, Shen., & Mac Namee, Brian. (2017, September). Evaluating citywide bus service reliability using noisy gps data. In *2017 International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1-6). IEEE.
- Yu, Haiyang., Chen, Dongwei., Wu, Zhihai., Ma, Xiaolei., & Wang, Yunpeng. (2016). Headway-based bus bunching prediction using transit smart card data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 45-59.
- Zhang, Hui., Shi, Baiying., Song, Shuguang., Zhao, Quanman., Yao, Xiangming., & Wang, Wei. (2019). Statistical analysis of the stability of bus vehicles based on GPS trajectory data. *Modern Physics Letters B*, 33(03), 1950015.
- Zhang, Hui., Li, Xu., Zhang, Lele., Wang, Wei., Jia, Jianmin., & Shi, Baiying. (2021). Discovering station patterns of urban transit network with multisource data: empirical evidence in Jinan, China. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(2), 680-691.
- Zhou, Tuqiang., Wu, Wanting., Peng, Liqun., Zhang, Mingyang., Li, Zhixiong., Xiong, Yubing., & Bai, Yuelong. (2022). Evaluation of urban bus service reliability on variable time horizons using a hybrid deep learning method. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108090.