

Extraction of Driving Cycles on Southern and Southwestern Tehran Province Freeways and their Potential Impact on Air Pollution

Khosro Ashrafi¹, Sajad Hakimi², Amirhosein Merrikh³, Arash Kouhi⁴, Milad Saberi⁵

1. Corresponding author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: khashrafi@ut.ac.ir
2. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sajadhakimi@ut.ac.ir
3. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: merrikh.amir@ut.ac.ir
4. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Arashkouhi@ut.ac.ir
5. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: milad.saberi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 15 March 2025
Received in revised form: 8 December 2025
Accepted: 12 December 2025
Available online: 17 September 2026

Keywords:

air quality,
driving cycles,
freeways,
K-means algorithm,
Tehran.

ABSTRACT

Objective: In this paper, the driving cycles on three major freeways, Tehran-Qom, Tehran-Saveh, and Tehran-Karaj, have been analyzed and extracted. These cycles have not yet been calculated comprehensively or even separately, and our goal is to provide new and precise data regarding driving cycles on these routes. The obtained information can be used to improve transportation policies, help create the basis for reducing pollutants, and optimize driving behavior in the future.

Method: To conduct this study, a light passenger car and a GPS application on the driver's cellphone were used. Vehicle speed data were collected at various time intervals along the selected routes. The data were then corrected using data-processing techniques and noise elimination. By employing MATLAB software and utilizing methods such as micro-trip analysis and the k-means algorithm, optimal driving cycles were extracted both individually for each route and for the combination of freeways. This process was undertaken to provide an accurate depiction of driving behavior on these routes.

Results: The findings indicate that the extracted driving cycles exhibit significant fluctuations in speed and acceleration. These fluctuations may be influenced by factors such as traffic congestion, the occurrence of accidents, and road and weather conditions, and they reflect the dynamic nature of driving conditions in different environments. When compared to global standard driving cycles, the driving pattern on the studied routes shows lower positive and negative accelerations, which may indicate a more cautious or smoother driving style on these routes. Moreover, most drivers tend to maintain higher speeds, such that their average speeds are higher than those of the standard cycles. Another notable point is the high proportion of driving time on these routes, which indicates few stops along the way and contributes to increased travel efficiency. In addition, the analysis shows that drivers' behavior is strongly influenced by road conditions, pavement quality, traffic flow, and changes in weather, highlighting the necessity of adapting driving strategies to varying environmental conditions in order to improve safety and efficiency.

Conclusions: The results of this study indicate that accurate extraction of driving cycles on the main freeways of Tehran Province can be used as an effective tool for estimating pollutant emissions and designing air pollution reduction policies. The results of the research, together with the examination of similarities, confirm the high accuracy of the software in extracting driving cycles. The differences emphasize the importance of developing a driving cycle that is compatible with drivers' behavior and the geographical conditions of each country, in comparison with other countries.

Cite this article: Ashrafi, Kh., Hakimi, S., Merrikh, A., Kouhi, A., & Saberi, M. (2026). Extraction of Driving Cycles on Southern and Southwestern Tehran Province Freeways and their Potential Impact on Air Pollution. *Journal of Environmental Studies*, 52 (2), 229-248. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.390121.1008584>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



<https://doi.org/10.22059/jes.2025.390121.1008584>

Introduction

One of the primary contributors to environmental challenges in metropolitan areas is vehicular traffic, with a substantial share stemming from gasoline-powered vehicles. While these vehicles play a vital role in personal mobility and economic activity, their extensive use in high-density cities not only undermines air quality and public well-being but also magnifies broader environmental concerns. It is important to note that real-world driving practices, encompassing acceleration, deceleration, and cruising, can vary considerably under different road types and traffic conditions. As a result, the rates of energy consumption and overall impacts from vehicles shift dramatically based on where, when, and how they are driven.

To understand and potentially mitigate these impacts, driving cycles serve as a crucial analytical tool. A driving cycle represents a sequence of instantaneous speed data and related parameters over a specific timeframe, effectively capturing how vehicles operate in typical traffic scenarios. Standardized driving cycles have been developed in many regions to guide regulations and performance assessments. However, one must acknowledge that such cycles often fail to reflect the unique conditions found in individual cities—factors like infrastructure design, rush-hour congestion, local driving habits, and vehicle composition. This highlights a crucial gap that needs to be addressed. In practice, crafting localized driving cycles can support more precise planning and policy decisions.

As urbanization accelerates and vehicle ownership continues to rise, understanding the region-specific characteristics of driving behavior becomes increasingly critical. In megacities such as Tehran, where traffic congestion is a persistent challenge, extracting accurate driving cycles is essential for estimating vehicular emissions, assessing fuel efficiency, and developing sustainable urban mobility policies. This is particularly relevant because international standards may not fully account for the distinct driving behaviors observed in Tehran. A locally derived driving cycle not only provides insights that can inform vehicle manufacturers, urban planners, and policymakers but also enhances the accuracy of environmental assessments.

This study presents driving cycles for the Tehran-Saveh, Tehran-Qom, and Tehran-Karaj freeways, both individually and in combination, using a clustering approach to analyze driving data. By doing so, it aims to bridge the gap between standardized cycles and real-world driving patterns, ultimately leading to more precise emissions estimations and better traffic modeling.

Method

This research was conducted in two primary stages: field data collection and data analysis. In the first stage, three main freeways around Tehran, namely Tehran-Qom, Tehran-Karaj, and Tehran-Saveh, were selected. A light gasoline vehicle was equipped with GPS Logger software, and the On-Board measurement method was chosen due to its ability to avoid the delays associated with chase-and-follow techniques. This method stands out because it allows for direct recording of speed-time profiles, latitude, longitude, and elevation. Data were collected at one-second intervals, resulting in more than 100,000 data points gathered during different hours of the day and night. Although signal loss in tunnels is a potential drawback of this method, it was not a concern in this study as the selected routes did not include any tunnels. To ensure data accuracy, an additional step was taken where noise-affected data points were identified and removed using filtering techniques. An acceptable error margin of 2% for key parameters was set to ensure greater reliability in the analysis.

In the second stage, the k-means clustering algorithm was employed to facilitate driving cycle extraction. The fundamental approach relies on micro-trips, which are defined as the time spans between vehicle movement initiation and its next stop. A key aspect to consider here is that these micro-trips were categorized into clusters using an iterative k-means clustering process, grouping similar segments based on speed-time characteristics. The clustering process followed Euclidean distance as the similarity measure and continued until the cluster centers stabilized or a predefined iteration limit was reached. By randomly combining representative micro-trips across the clusters, an optimal driving cycle was derived.

For data processing and analysis, MATLAB was selected due to its advanced capabilities in numerical computation, algorithm development, and data visualization. The final driving cycle was validated by ensuring that its speed, acceleration, and duration metrics closely matched real-world driving conditions.

This step was particularly important because it confirmed that the extracted driving cycle truly reflected Tehran's freeway conditions.

Results

This study examines optimal driving cycles for the Tehran-Qom, Tehran-Karaj, and Tehran-Saveh freeways, revealing significant variations in driving characteristics across these routes. Due to differences in traffic conditions, speed fluctuations, and acceleration patterns among these highways, the combined driving cycle serves as a comprehensive representation of driving behavior on Tehran's freeways.

The Tehran-Qom freeway had the highest average speed, reaching 109 km/h. It also showed rapid acceleration at the start of the route, making it the fastest among the three freeways. The Tehran-Karaj and Tehran-Saveh freeways demonstrated similar driving patterns, yet the Tehran-Karaj route experienced the most significant speed fluctuations due to its heavy traffic congestion at specific times of the day. The combined driving cycle, representing all three freeways, recorded an average speed of 85.6 km/h, with vehicles remaining in motion for approximately 99.05% of the total driving time. Comparisons with global driving cycle standards provide valuable insights.

A comparative analysis of Tehran's driving cycles and established standard cycles reveals notable distinctions in driving patterns. The Tehran-Karaj cycle exhibited twice the acceleration levels of the Highway Fuel Economy Test (HWFET) cycle, a standardized highway driving protocol developed by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). This suggests a more dynamic and aggressive driving behavior within the Tehran-Karaj corridor. While Tehran's cycles share similarities with the New European Driving Cycle (ECE + EUDC)—a European standard used to evaluate vehicle emissions and fuel consumption—they display greater variability in acceleration, indicating a less uniform and more fluctuating driving pattern. In addition, the findings indicate that Tehran's freeway driving cycles align more closely with the Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) than with the New European Driving Cycle (NEDC), the latter of which is increasingly regarded as outdated and unrepresentative of modern real-world driving conditions. The higher proportion of driving time and greater average speeds recorded on Tehran's freeways, compared to conventional test cycles, suggest reduced frequency of rapid acceleration and deceleration. These findings highlight how environmental factors and local traffic conditions influence real-world driving patterns, directly affecting emission estimates and fuel consumption analysis.

Further comparisons with non-standard local cycles, such as the Tehran urban cycle and the Tehran-Amol highway cycle, reveal significant differences mainly due to heavier urban traffic. These findings underscore the importance of extracting and analyzing driving cycles tailored to the unique conditions of densely populated cities like Tehran to enhance traffic modeling and vehicle performance assessments.

Conclusions

This research focuses on the extraction of a driving cycle, which is recognized as one of the most effective methods for estimating emissions from the transportation fleet and fuel consumption of vehicles. Developing accurate driving cycles provides a comprehensive framework for estimating pollutant emissions from mobile sources. By doing so, it enables policymakers to make more data-driven decisions aimed at mitigating air pollution and improving overall air quality.

Since no specific driving cycle has been developed for Tehran's main freeways, this study aimed to create a strong basis for estimating emissions from vehicles in the region. The findings of this research indicate that drivers tend to maintain a relatively constant speed. This observation is particularly relevant since it suggests that Tehran's driving behavior is not drastically different from patterns observed in other metropolitan areas. Moreover, the strong similarity between the driving cycle developed in this study and internationally recognized cycles highlights the high accuracy and reliability of the data collection software used in this research. Such consistency validates the software's effectiveness and suggests that it could be applied in future studies across other urban regions.

Furthermore, the findings of this study could play a pivotal role in enhancing transportation infrastructure planning and traffic management strategies. By incorporating locally derived driving cycles into traffic simulation models, urban planners and policymakers can gain a more accurate understanding of congestion

patterns, peak-hour traffic behavior, and fuel consumption trends. This is crucial because it can lead to the optimization of traffic signal timing, the development of adaptive speed limit policies, and the improvement of road network efficiency. Ultimately, the differences observed between local driving behavior and standardized international cycles emphasize the necessity of calculating country-specific driving cycles rather than relying solely on global standards. This distinction is critical for ensuring that pollution control strategies and transportation policies truly align with local conditions. Additionally, future studies could explore the impact of electric and hybrid vehicles on Tehran's freeway driving cycles, given their growing adoption in urban areas. This would not only provide insights into fuel efficiency improvements and emission reductions but also aid in shaping policies that facilitate a transition toward greener urban mobility solutions.

Author Contributions

Khosro Ashrafi: Methodology, Data validation and Formal analysis. Sajad Hakimi: Data validation, Formal analysis, Data resources, Software and Writing. Amirhosein Merrikh: Data validation, Formal analysis, Data resources, Software and Writing. Arash Kouhi: Data resources. Milad Saberi: Software.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors hereby declare that they have used ChatGPT to a limited extent to assist in identifying relevant literature for the research background. All references and information suggested by ChatGPT were carefully reviewed and verified by the authors, and the authors take full responsibility for the final content of the manuscript.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



استخراج سیکل‌های رانندگی در آزادراه‌های جنوب و جنوب غربی استان تهران و تأثیر بالقوه آنها بر آلودگی هوا

خسرو اشرفی^۱✉، سجاد حکیمی^۲، امیرحسین مریخ^۳، آرش کوهی^۴، میلاد صابری^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: khashrafi@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sajadhakimi@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: merrikh.amir@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Arashkouhi@ut.ac.ir

۵. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: milad.saberi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: در این مقاله، به بررسی و استخراج چرخه رانندگی در سه آزادراه اصلی تهران-قم، تهران-ساوه و تهران-کرج پرداخته شده است. این چرخه‌ها تاکنون به‌طور جامع یا حتی مجزا محاسبه نشده‌اند و هدف پژوهش ارائه داده‌های جدید و دقیق درباره سیکل رانندگی در این مسیرها است. اطلاعات به‌دست آمده می‌تواند برای بهبود سیاست‌های حمل‌ونقل، کمک به فراهم‌سازی بستر کاهش آلاینده‌ها و بهینه‌سازی رفتار رانندگی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

روش پژوهش: برای انجام این پژوهش، از یک خودروی سواری سبک و یک نرم‌افزار سامانه موقعیت‌یابی جهانی نصب‌شده روی تلفن همراه استفاده شد. داده‌های سرعت خودرو در بازه‌های زمانی مختلف و در مسیرهای منتخب جمع‌آوری گردید. سپس داده‌ها با استفاده از تکنیک‌های پردازش داده و حذف نویز، اصلاح شدند. به کمک نرم‌افزار متلب و استفاده از روش میانگین کی و تحلیل ریز سفرها، هم به‌صورت مجزا برای هر کدام از مسیرها و هم برای ترکیبی از سه آزادراه، چرخه‌های رانندگی بهینه استخراج شدند. این فرایند به‌منظور ارائه تصویری دقیق از رفتار رانندگی در این مسیرها انجام شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۶

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهد که چرخه‌های رانندگی استخراج‌شده دارای نوسانات قابل‌توجهی در سرعت و شتاب هستند. این نوسانات ممکن است تحت تأثیر عواملی از جمله تراکم ترافیک، وقوع تصادفات و شرایط جاده‌ای و آب‌وهوایی قرار گیرد و بازتاب‌دهنده پویایی شرایط رانندگی در محیط‌های مختلف است. در مقایسه با چرخه‌های استاندارد جهانی، الگوی رانندگی در مسیرهای مورد بررسی شتاب‌های مثبت و منفی کمتری را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر سبک رانندگی محتاطانه‌تر یا روان‌تر در این مسیرها باشد. همچنین، بیشتر رانندگان تمایل به رانندگی با سرعت‌های بالا دارند، به‌طوری‌که میانگین سرعت آن‌ها از چرخه‌های استاندارد بالاتر است. یکی دیگر از نکات قابل‌توجه، نسبت بالای زمان رانندگی در این مسیرهاست که نشان‌دهنده توقف کم در طول مسیر می‌باشد و به افزایش بهره‌وری سفر کمک می‌کند. علاوه بر این، تحلیل‌ها نشان می‌دهد که رفتار رانندگان تحت تأثیر شرایط جاده‌ای، کیفیت روسازی، جریان ترافیک و تغییرات آب‌وهوایی قرار می‌گیرد و این امر ضرورت تطبیق راهبردهای رانندگی با شرایط متغیر محیطی را برای ارتقای ایمنی و کارایی برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها:

الگوریتم میانگین کی،
آزادراه‌ها،
تهران،
چرخه رانندگی،
کیفیت هوا.

نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری این پژوهش نشان می‌دهد که استخراج دقیق چرخه‌های رانندگی در آزادراه‌های اصلی استان تهران می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای برآورد انتشار آلاینده‌ها و طراحی سیاست‌های کاهش آلودگی هوا به کار گرفته شود. نتایج این تحقیق، همراه با بررسی شباهت‌ها، دقت بالای نرم‌افزار در استخراج سیکل‌های رانندگی را تأیید می‌کند. همچنین تفاوت‌ها، بر اهمیت تهیه سیکل رانندگی متناسب با رفتار رانندگان و شرایط جغرافیایی هر کشور، در مقایسه با سایر کشورها، تأکید دارد.

استناد: اشرفی، خسرو؛ حکیمی، سجاد؛ مریخ، امیرحسین؛ کوهی، آرش؛ و صابری، میلاد (۱۴۰۵). استخراج سیکل‌های رانندگی در آزادراه‌های جنوب و جنوب غربی استان تهران و تأثیر بالقوه آنها بر آلودگی هوا. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۲ (۲)، ۲۳۹-۲۴۸. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.390121.1008584>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا در کلان‌شهرها، وسایل نقلیه هستند که بخش عمده‌ای از آن را خودروهای بنزینی سبک شامل می‌شوند. این موضوع نه تنها بر کیفیت هوا و سلامت عمومی تأثیرگذار است، بلکه به افزایش تغییرات اقلیمی و گرم شدن کره زمین نیز دامن می‌زند. میزان مصرف سوخت خودرو و انتشار آلاینده‌های هوا از آن، در شرایط مختلف جاده‌ای و ترافیکی، تحت تأثیر الگوی رانندگی قرار دارد. چرخه‌های رانندگی، نشان‌دهنده الگوی معمول رانندگی وسیله نقلیه در یک منطقه خاص یا یک نوع وسیله نقلیه خاص با یک سری زمانی از سرعت‌های لحظه‌ای، به عنوان یک ابزار ارزشمند برای برآورد دقیق انتشار آلاینده‌های خودرو شناخته می‌شوند (Jing et al., 2017; Qiu et al., 2018; Zhao et al., 2018).

سیکل‌های رانندگی، که شامل مجموعه‌ای از داده‌های سرعت لحظه‌ای و سایر پارامترهای رانندگی در بازه زمانی مشخص هستند، نه تنها در برآورد آلاینده‌ها، بلکه در طراحی سیاست‌های حمل‌ونقل پایدار نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند. در این راستا، تعیین سیکل‌های رانندگی متناسب با شرایط محلی، مانند الگوی ترافیک، ترکیب خودروها و نوع جاده‌ها، به‌ویژه در شهرهای بزرگ، یکی از نیازهای ضروری برای بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات زیست‌محیطی است (Gebisa et al., 2021).

چندین چرخه رانندگی استاندارد، از جمله چرخه جدید رانندگی اروپا^۱ (NEDC) و چرخه آزمون وسایل نقلیه سبک همگام جهانی^۲ (WLTC) برای پشتیبانی از آزمون‌های نظارتی آلاینده‌های انتشار یافته و میزان مصرف سوخت ایجاد شده‌اند تا فرایند صدور گواهینامه آلاینده‌های برای وسایل نقلیه جدید قبل از ورود به بازار خودروهای محلی را تکمیل کنند. به‌طور مثال، استاندارد آلاینده‌های مرسوم در ایران یورو ۴ می‌باشد. اما برخی از خودروها دارای استاندارد یورو ۵ و یورو ۶ نیز هستند.

با این حال چرخه‌های رانندگی استاندارد که بر اساس مجموعه داده‌های نمونه‌گیری گسترده در یک منطقه یا کشور خاص ایجاد شده‌اند، نمی‌تواند الگوهای رانندگی در دنیای واقعی را نشان دهند؛ بنابراین با استفاده از چرخه‌های رانندگی استاندارد نمی‌توان به‌طور دقیق میزان انتشار خودرو را در یک شهر خاص تخمین زد. به‌عنوان مثال، انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، هیدروکربن‌ها (HC) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) محاسبه‌شده بر اساس چرخه رانندگی سنگاپور ۵ درصد، ۸ درصد، ۲۲ درصد و ۴۷ درصد بیشتر از آنهایی است که بر اساس NEDC محاسبه شده است (Ho, et al., 2014). همچنین در هند، انتشارات شبیه‌سازی شده برای HC، CO و NO_x بر اساس چرخه جاده به‌ترتیب ۱۵۵، ۶۳ و ۶۴ درصد بیشتر از انتشارات محاسبه شده بر اساس WLTC بود (Pathak et al., 2016).

بنابراین بر اساس داده‌های محلی باید چرخه‌های رانندگی مخصوص هر شهر تعیین شود تا بتوان دقت تخمین انتشار آلاینده‌ها را افزایش داد. با این حال، چرخه‌های رانندگی در سطح یک شهر را نمی‌توان به‌طور گسترده در شهرهای دیگر اعمال کرد؛ زیرا شرایط ترافیکی در شهرهای مختلف کاملاً متفاوت است. چرخه‌های رانندگی نه تنها بین شهرهای مختلف متفاوت است، بلکه در انواع جاده‌های مختلف با پارامترهای رانندگی متفاوت، از جمله معیارهای حد سرعت، ترکیب ناوگان خودرو، تراکم جریان ترافیک و تعداد چراغ‌های راهنمایی، اختلافات زیادی را نشان می‌دهد (Vanhuysel et al., 2014).

به‌طور کلی، وسایل نقلیه در بزرگراه‌ها سرعت بالاتری دارند؛ اما شتاب‌گیری یا کاهش شتاب کمتری نیز دارند. در حالی که خودروهایی که در جاده‌های شریانی شهری با تراکم ترافیک بیشتر قرار دارند، سرعت پایین‌تری دارند، اما شتاب، کاهش سرعت و دور آرام‌تری را تجربه می‌کنند (Chen et al., 2018). شتاب و کاهش مکرر سرعت باعث افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های بیشتر می‌شود (Frey et al. 2003; Fruin et al., 2008).

بنابراین، چرخه‌های رانندگی و عوامل انتشار در جاده‌های مختلف متفاوت هستند. در یک مطالعه نشان داده شد که عوامل انتشار CO در بزرگراه‌ها به‌طور کلی کمتر از جاده‌های شریانی شهری است (Huang et al., 2013). از این‌رو، برای بهبود تخمین آلاینده‌های خودرو و تغییرات فضایی آنها، چرخه‌های رانندگی مبتنی بر نوع جاده باید برای بیان الگوهای رانندگی مختلف در انواع جاده‌ها ایجاد شوند. با این

1. New European Driving Cycle
2. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

حال، اکثر چرخه‌های رانندگی فعلی در سطح شهر توسعه یافته‌اند و تغییرات آنها در انواع جاده‌ها نادیده گرفته شده است. در این مقاله، چرخه رانندگی برای هر یک از آزادراه‌های تهران-ساوه، تهران-قم و تهران-کرج به صورت جداگانه و ترکیبی با استفاده از رویکرد خوشه‌بندی داده‌های رانندگی ارائه شده است. این مطالعه با هدف تدوین چرخه رانندگی جدید برای آزادراه‌های نام برده شده در استان تهران تدوین شده است، در حالی که در مطالعات قبلی جمع‌آوری داده‌ها فقط برای محیط شهری انجام شده بود.

پیشینه پژوهش

روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی سیکل‌های رانندگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در میان آنها، روش زنجیره مارکوف^۱ از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار است و در تحقیقات زیادی به کار گرفته شده است (Zähringer et al., 2020). باوجود سادگی این روش و توانایی آن در دسته‌بندی وضعیت‌ها، محدودیت‌هایی نیز دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از اصلی‌ترین معایب این روش، ساده‌سازی بیش‌ازحد فرضیات و ناتوانی در مدل‌سازی رفتارهای پیچیده است. به عنوان مثال، از آنجایی که زنجیره‌های مارکوف برای شرایط ثابت طراحی شده‌اند، در پیش‌بینی تغییرات ناگهانی در شرایط محیطی عملکرد مطلوبی ندارند.

اگرچه زنجیره‌های مارکوف ابزارهای مفیدی برای تحلیل برخی فرایندها به شمار می‌روند، اما محدودیت‌های آنها در مدل‌سازی سیکل‌های رانندگی قابل توجه است. این مدل‌ها نمی‌توانند پیچیدگی‌ها و تغییرات دینامیکی رفتار رانندگان را به طور کامل شبیه‌سازی کنند و به همین دلیل برای تحلیل دقیق الگوهای رانندگی گزینه مناسبی محسوب نمی‌شوند. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ضروری است از روش‌های تحلیلی پیشرفته‌تری استفاده شود که بتوانند عوامل متعدد مؤثر بر رفتار رانندگان را در نظر بگیرند (Zhang et al., 2018).

یکی از روش‌های جایگزین برای بهینه‌سازی سیکل‌های رانندگی، روش خوشه‌بندی میانگین-کی^۲ است که می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای زنجیره مارکوف در تحلیل سیکل‌های رانندگی عمل کند. این روش، که به عنوان یکی از الگوریتم‌های برجسته در یادگیری ماشین شناخته می‌شود، به دلیل توانایی آن در خوشه‌بندی داده‌ها و شناسایی الگوهای پنهان در داده‌های پیچیده، مزایای قابل توجهی نسبت به زنجیره مارکوف دارد.

روش میانگین-کی می‌تواند داده‌های مربوط به رفتار رانندگان را بر اساس معیارهای مختلفی مانند سرعت، شتاب و الگوهای توقف به خوشه‌های مشخص تقسیم کند. این قابلیت به محققان امکان می‌دهد الگوهای پیچیده‌تری را در داده‌ها شناسایی کنند که زنجیره مارکوف قادر به مدل‌سازی آنها نیست. به عنوان مثال، میانگین-کی می‌تواند داده‌ها را به صورت پویا به خوشه‌های مختلف تقسیم کرده و تغییرات ناگهانی در شرایط رانندگی را نیز در نظر بگیرد، و بدین ترتیب تحلیل دقیق‌تر و انعطاف‌پذیرتری ارائه دهد (Nie et al., 2022). در پژوهش حاضر نیز، با اتکا به همین منطق، روش خوشه‌بندی میانگین-کی برای استخراج سیکل رانندگی انتخاب شده است تا ضمن بهره‌گیری از داده‌های واقعی، پیچیدگی‌های رفتاری رانندگان و ناهمگنی‌های شبکه‌ای در قالبی شفاف و بازتولید پذیر مدل شود. این انتخاب از یک سو ادامه مسیر ادبیات داده محور استخراج سیکل‌های رانندگی است و از سوی دیگر پاسخی مستقیم به کاستی‌های شناخته شده رویکردهای صرفاً مارکوفی به شمار می‌رود. افزون بر آن، هدف این مطالعه نه فقط ساخت چرخه‌ای با شاخص‌های کلی مناسب (سرعت متوسط، سهم زمان توقف، و توزیع شتاب/کاهش سرعت)، بلکه بازنمایی واقع‌بینانه دینامیک گذار میان حالات رانندگی در شرایط بومی و واقعی تهران است.

در کشورهای با شرایط ترافیکی و الگوهای رانندگی نزدیک به ایران، شواهد روشنی در تأیید ضرورت استخراج چرخه‌های محلی و برتری رویکردهای خوشه‌بندی نسبت به اتکا به سیکل‌های استاندارد جهانی گزارش شده است. در قاهره بزرگ، نخستین چرخه نماینده برای خودروهای سواری بنزینی بر مبنای پایش‌های پر تفکیک از ۸۷ خودرو در ۱۰ ناحیه متمایز شهری و با تکیه بر خوشه‌بندی‌های K-means و K-medoids توسعه داده و نشان داده شد که چرخه بومی‌شده در برآورد مصرف سوخت و نرخ‌های انتشار تحت شرایط واقعی قاهره از چرخه‌های جهانی مانند FTP/ECE دقیق‌تر است (Huzayyin et al., 2021).

1. Markov Chain

2. K-Means Clustering

در استانبول، برای ناوگان سامانه اتوبوس‌های تندرو، چرخه‌ای مبتنی بر داده‌های میدانی و نمونه‌گیری لایه‌ای توسعه یافت که به‌طور مشخص دینامیک‌های توقف- شتاب پرتکرار در کریدورهای پرتراکم شهری را در پارامترهای چرخه منعکس می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که اگر چرخه محلی با روش‌های داده محور و خوشه‌بندی استخراج شود، نه تنها شاخص‌های کلی سرعت و توقف، بلکه توزیع‌های جزئی‌تری مانند فراوانی رخدادهای شتاب- ترمز و طول قطعات حرکت یکنواخت نیز با واقعیت همخوان خواهد بود؛ امری که برای ارزیابی دقیق انرژی- انتشار در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی کلیدی است (Kaymaz et al., 2019).

در آمان اردن نیز چرخه رانندگی شهری بر اساس داده‌های میدانی واقعی تدوین و در قالب یک مقاله کنفرانسی منتشر شد. در این کار، علاوه بر تشریح فرایند گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها، چرخه استخراج شده برای ارزیابی کارایی سامانه‌های قوای محرکه و برآورد انتشار آلاینده‌ها به کار گرفته شد و نشان داده شد که چرخه‌های استاندارد بین‌المللی نماینده مناسبی برای شرایط رانندگی این شهر نیستند. اهمیت این مطالعه در منطقه خاورمیانه از آن روست که بافت ترافیکی مشابه، الگوهای توقف پرتکرار و رفتارهای شتابی متفاوت نسبت به شهرهای اروپایی- آمریکایی را به‌صورت بومی در چرخه لحاظ می‌کند (Abu Mallouh et al., 2014).

در عراق، چرخه رانندگی واقعی برای شهر بعقوبه با رویکرد ریز سفر (micro-trip) تدوین و با چرخه‌های بین‌المللی مقایسه شد. روش کار بدین‌صورت بود که از داده‌های سرعت واقعی ریز سفرها استخراج، ریز سفرهای پرتکرار به‌عنوان بلوک‌های سازنده انتخاب و با ترتیبی نظام‌مند مونتاژ شدند تا چرخه‌ای با مدت‌زمانی نماینده و شاخص‌های آماری نزدیک به توزیع واقعی ترافیک شکل گیرد. تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که تفاوت‌های معنادار در سهم زمان‌های توقف، فراوانی رخدادهای شتابی و سطح سرعت متوسط، ضرورت استفاده از چرخه‌های محلی را برای برآوردهای واقع‌بینانه مصرف سوخت و انتشار نشان می‌دهد (Al-Samari, 2017).

در ایران نیز ادبیات پژوهشی همسو با این مسیر رو به رشد است. فتوحی و منتظری، سیکل رانندگی شهر تهران را با استفاده از روش خوشه‌بندی میانگین-کی توسعه دادند. سیکل به‌دست آمده دارای مدت زمان کل ۱۵۳۳ ثانیه، سرعت متوسط ۳۳/۸۳ کیلومتر بر ساعت و ۱۵/۲۶ درصد زمان توقف است. این سیکل ویژگی‌های متمایزی از جمله سرعت متوسط بالاتر و درصد زمان توقف کمتر در مقایسه با سیکل‌های استاندارد مانند ECE^۱، EUDC^۲ و FTP^۳ دارد و به‌عنوان ابزاری مناسب برای ارزیابی مصرف سوخت و آلاینده‌های محدودده‌های متوسط معرفی شده است (Fotouhi & Montazeri-Gh, 2013).

در پژوهشی که توسط مهر قرائتی و همکاران شکل گرفت به این نتیجه رسیدند که داده‌های چرخه رانندگی در مسیر تهران به آمل به دلیل ویژگی‌های مسیر و نحوه رانندگی در ایران، تمایل بیشتری به حرکت‌های شتاب‌دار و سرعت‌های بالا دارد. این یافته‌ها بر نیاز به طراحی چرخه‌های رانندگی و موتورهای متناسب با شرایط ایران تأکید دارد (مهرقرائتی و همکاران، ۱۳۹۸).

ملک‌پور و همکاران نیز در مقاله خود که به تعیین سیکل رانندگی در ساعت پیک صبحگاهی شهر رشت پرداخته بودند، به این نتیجه رسیدند که مقایسه سیکل به‌دست آمده شهر رشت با سیکل‌های استاندارد جهانی نشان داد که این سیکل با شرایط واقعی رانندگی در منطقه مطالعه همخوانی دارد و از دقت بالایی برخوردار است. و نشان دادند که نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری، سیاست‌گذاری‌های کاهش آلاینده‌ها، و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی ترافیک مورد استفاده قرار گیرد (ملک‌پور اسطلکی و احمدی ارکمی، ۱۴۰۱).

میرشی و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر الگوی رانندگی بر میزان آلاینده‌های تولیدی توسط خودروها در شهر تهران پرداختند که با بهره‌گیری از مدل محاسبه انتشار آلاینده‌های IVE^۴ و مقایسه میزان تولید آلودگی در تهران با سایر شهرهای مشابه جهان، به این نتیجه رسیدند که تغییر الگوی رانندگی می‌تواند کاهش چشمگیری در انتشار آلاینده‌های معیار ایجاد کند (میرشی و همکاران، ۱۳۹۱).

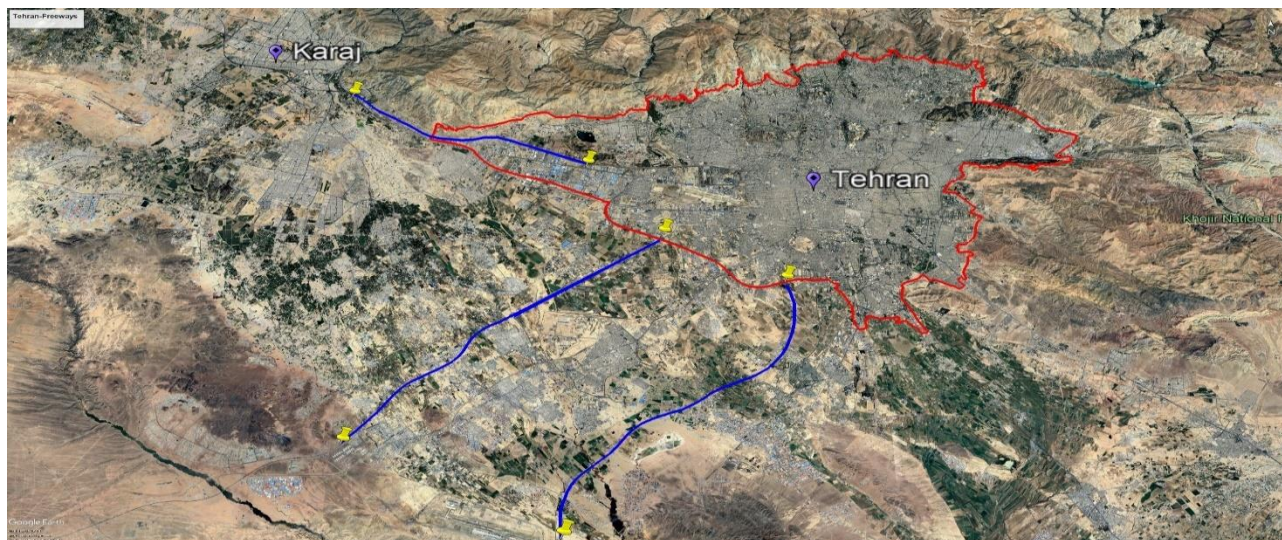
در هر منطقه، چرخه رانندگی شرایط خاص جاده، وضعیت ترافیک، و عادات رانندگی ساکنان آن منطقه را منعکس می‌کند. با درک این عوامل، می‌توان خودروها را به‌گونه‌ای طراحی کرد که در شرایط رانندگی واقعی بهتر عمل کنند. در مطالعه‌ای که توسط گیتا و

1. Electronic Control Unit
2. Extra Urban Driving Cycle
3. Federal Test Procedure drive cycle
4. International Vehicle Emission

سوبرامانی شکل گرفت، یک سامانه آزمایشی برای تولید یک چرخه رانندگی مبتنی بر شرایط واقعی رانندگی در مسیری منتخب ارائه شد که تمام چهار حالت عملیاتی رانندگی شامل شتاب‌گیری، ترمزگیری، توقف و حرکت ثابت را در نظر می‌گیرد. میکرو سفرهای ثبت شده در این حالات پردازش شده تا یک چرخه رانندگی واقعی توسعه یابد که بینش‌هایی در مورد عملکرد خودرو از جمله مدت‌زمان حرکت با سرعت بالا و فراوانی توقف‌ها ارائه دهد (Geetha & Subramani, 2019).

روش‌شناسی پژوهش

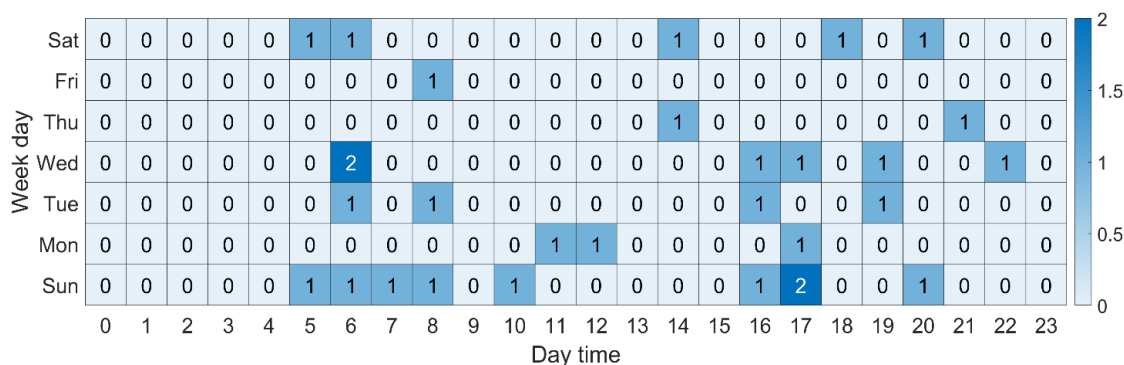
روش‌شناسی پژوهش حاضر در دو بخش به‌هم‌پیوسته طراحی و اجرا شد: گردآوری داده‌های میدانی و استخراج و اعتبارسنجی سیکل رانندگی. گردآوری داده‌ها در بازه تابستان و پاییز سال ۱۴۰۳ و در ساعات پرتردد روز، از ساعت ۶ تا ۲۲، انجام شد تا اثر تنوع زمانی و فصلی ترافیک در نمونه‌ها بازتاب یابد. مسیرهای انتخابی شامل سه آزادراه تهران-قم، تهران-کرج و تهران-ساوه است که برای پوشش طیف رفتارهای رانندگی رایج پیرامون کلان‌شهر تهران برگزیده شدند و نمای کلی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مسیرهای انتخاب شده از ۳ آزادراه اصلی تهران-قم، تهران-کرج و تهران-ساوه

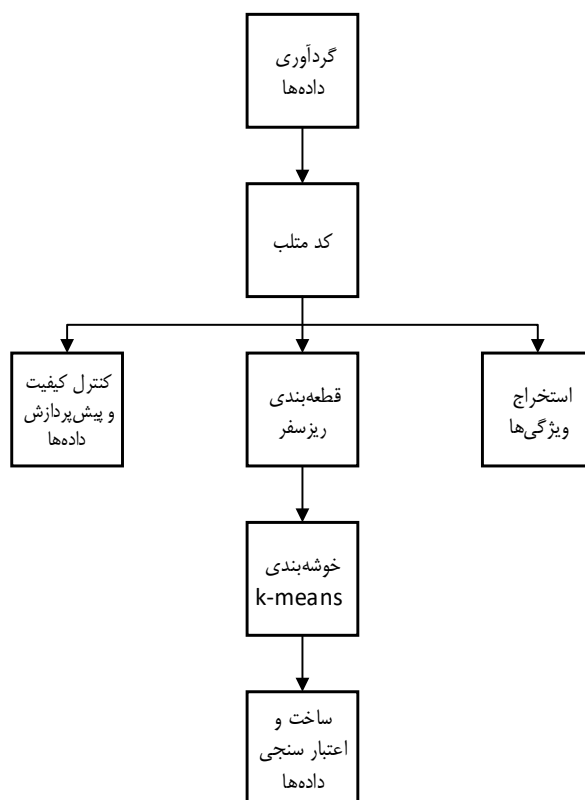
با توجه به رویکردهای متداول داده‌برداری شامل روش تعقیب‌و‌گریز، تکنیک هیبریدی و اندازه‌گیری آن‌برد، روش آخر به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. زیرا، در قیاس با تعقیب‌و‌گریز که مستعد تأخیر در ثبت و سوگیری مشاهده‌ای است، اندازه‌گیری مستقیم بر روی وسیله نقلیه دقت و کنترل بالاتری بر کیفیت داده فراهم می‌کند. به این ترتیب، با بهره‌گیری از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و اپلیکیشن GPS Logger، پروفایل سرعت-زمان به همراه طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع در مسیرهای یادشده با نرخ نمونه‌برداری حدود یک هرتز و دقت مکانی تقریباً ۲ تا ۵ متر ثبت گردید. در مجموع بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ نقطه داده در ساعات مختلف شبانه‌روز گردآوری شد که به‌طور معناداری دقت برآوردهای آماری خروجی را تقویت می‌کند.

محدودیت‌های ذاتی اندازه‌گیری آن‌برد مانند احتمال افت سیگنال در تونل در این مطالعه مؤثر نبود؛ زیرا در مسیرهای انتخابی تونلی وجود نداشت. برای ارتقای کیفیت نهایی و جلوگیری از تحریف شاخص‌ها، پس از پایش خودکار نویز، شمار اندکی از نقاط آشکارا پرت با بازیابی کنترل‌شده حذف شد. برای نمایش جامعیت پوشش زمانی، در مسیر تهران-کرج، شکل ۲ الگوی نمونه‌برداری روز-ساعت را نشان می‌دهد؛ به این معنا که برای هر روز تقویمی و هر بازه ساعتی (۶ تا ۲۲)، وجود داده معتبر ثبت‌شده در آن ساعت با یک‌خانه نمایش داده‌شده و شدت رنگ بیانگر تعداد روزهایی است که در همان ساعت داده‌برداری انجام شده است. بدین ترتیب، شکل فراوانی روزهای داده‌برداری به تفکیک ساعت را در روزهای مختلف هفته بازنمایی می‌کند.



شکل ۲. تعداد داده‌های جمع‌آوری شده از مسیر تهران - کرج به تفکیک روز - ساعت

داده‌های خام GPX که خروجی برنامه GPS Logger است، در قالب XML^۱ ساخت‌یافته ذخیره می‌شود و هر فایل شامل مجموعه‌ای از نقاط مسیر (track points) است که به ترتیب زمانی ثبت شده‌اند. این نقاط شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، زمان ثبت و در برخی دستگاه‌ها متغیرهای کمکی مانند سرعت لحظه‌ای هستند. در این پژوهش، فایل‌های GPX با نرخ نمونه‌برداری حدود یک هرتز گردآوری شد. نمای کلی مسیر پژوهش از گردآوری داده تا ساخت و اعتبارسنجی چرخه در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل پژوهش

مطابق شکل ۳، پس از گردآوری داده‌ها، ابتدا کنترل کیفیت و پیش‌پردازش انجام شد تا داده‌ها برای قطعه‌بندی ریز سفر و استخراج

ویژگی‌ها آماده شوند. به این منظور، پس از ورود داده‌ها، اعتبارسنجی ساختاری (بررسی به ترتیب بودن گام‌های زمانی و حذف رکوردهای ناقص یا دارای خطای مکانی) انجام گرفت، سپس همه مقادیر به واحدهای سازگار تبدیل و محور زمان روی شبکه یکنواخت یک‌ثانیه‌ای هم‌تراز شد. کنترل کیفیت زمانی بدین‌صورت اعمال گردید که هر قطعه‌ای که بیش از حدود ۱۰ درصد فواصل بین نمونه‌های آن از گام نمونه‌برداری فراتر می‌رفت، به‌عنوان داده کم کیفیت کنار گذاشته شد. مقادیر آشکارا پرت در سرعت و شتاب محدود یا حذف، و گسست‌های بسیار کوتاه و در صورت نیاز با درون‌یابی کوتاه‌مدت تصحیح شد. پیش از ورود به مرحله استخراج سیکل، نماهای توصیفی شامل نمودارهای سرعت-زمان، ارتفاع-زمان، شیب مسیر برای هر سفر ترسیم گردید تا ماهیت ترافیک و الگوی رفتاری رانندگی به‌صورت کامل ارزیابی شود.

روش استخراج سیکل رانندگی بر پایه ریز سفرها می‌باشد. ریز سفر به مدت‌زمان شروع به حرکت دستگاه تا توقف بعدی گفته می‌شود. برای ایجاد سیکل رانندگی، ریز سفرها به‌صورت تصادفی با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا مادامی که بهترین سیکل رانندگی استخراج شود (Wang et al., 2008). الگوریتم استفاده شده برای دسته‌بندی ریز سفرها، الگوریتم بدون ناظر میانگین-کی می‌باشد که نسبت به روش‌های دیگر دارای مزیت در سهولت استفاده و سرعت پاسخ‌دهی بالاتر می‌باشد (آزادی و همکاران، ۱۴۰۱).

استخراج سیکل در این پژوهش نیز بر مبنای ریز سفر انجام شد. مرزهای ریز سفر با به‌کارگیری آستانه توقف تعریف شد؛ به این معنا که اگر سرعت برای مدت حداقلی از پیش تعیین شده پایین‌تر از آستانه باقی بماند، آن لحظه «توقف کامل» تلقی و ریز سفر خاتمه می‌یابد. این قاعده موجب تمایز توقف‌های واقعی از نوسان‌های گذرای سرعت می‌شود و بنیانی سازگار برای بخش‌بندی سفرها فراهم می‌آورد.

پس از بخش‌بندی، برای هر ریز سفر و نیز برای کل سفر مجموعه‌ای از ویژگی‌های توصیفی محاسبه شد تا رفتار رانندگی به‌صورت کمی نمایان گردد. سهم زمانی هر وضعیت (رانندگی، توقف، کروژ، شتاب‌گیری و کاهش سرعت) به‌صورت نسبت زمان آن وضعیت به زمان کل گزارش شد. میانگین سرعت کل با میانگین‌گیری از مقادیر ثبت‌شده در طول سفر به‌دست آمد و میانگین سرعت رانندگی تنها بر روی بازه‌هایی محاسبه شد که سرعت صفر نبود تا اثر توقف‌ها حذف شود. برای پویایی حرکت، شتاب به‌عنوان تغییرات سرعت در زمان استخراج شد و میانگین‌های شتاب مثبت و شتاب منفی به‌طور جداگانه محاسبه گردید. انحراف معیار سرعت و شتاب به کار رفت تا تغییرپذیری این کمیت‌ها سنجیده شود. افزون بر این، رویدادهای شتاب‌گیری با اعمال آستانه حداقلی بر قدرمطلق شتاب و شرط حداقل طول رویداد شمارش شد تا از شمردن نویزهای ریز جلوگیری شود. تعداد توقف‌ها نیز بر مبنای عبور سرعت از آستانه توقف در مدت‌زمان حداقلی تعیین گردید و میانگین طول توقف از روی همان معیار برآورد شد. در پایان، طول پیمایش با تجمیع سرعت‌های نمونه‌ای در گام‌های زمانی، و زمان کل سفر با جمع زمان‌های ثبت‌شده محاسبه شد. این سبب ویژگی‌ها هم مبنای خوشه‌بندی ریز سفرها قرار گرفت و هم معیار ارزیابی نزدیکی سیکل نهایی به رفتار واقعی میدان محسوب شد.

در روش خوشه‌بندی میانگین-کی، مجموعه‌ای از داده‌ها به K خوشه تقسیم می‌شود، به‌گونه‌ای که هر خوشه شامل نقاطی با بیشترین شباهت به یکدیگر است. به‌صورت ریاضی، اگر $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ مجموعه‌ای از n نقطه در فضای N -بعدی باشد و $C_1, C_2, \dots, C_K$ خوشه‌های موردنظر باشند، شرایط زیر برقرار است:

- هیچ خوشه‌ای خالی نیست:

رابطه (۱)

$$C_i \neq \emptyset \text{ for } i = 1, 2, \dots, K$$

- هیچ نقطه‌ای به‌طور هم‌زمان به دو خوشه تعلق ندارد:

رابطه (۲)

$$C_i \cap C_j = \emptyset \text{ for } i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, K$$

- اجتماع تمام خوشه‌ها، کل مجموعه داده‌ها را پوشش می‌دهد:

رابطه (۳)

$$\bigcup_{i=1}^K C_i = S$$

مراحل اجرای الگوریتم میانگین کی به شرح زیر است (Maulik & Bandyopadhyay, 2000):

(۱) ابتدا K نقطه به‌عنوان مراکز اولیه خوشه‌ها ($z_1, z_2, \dots, z_K$) به‌صورت تصادفی از مجموعه داده S انتخاب می‌شوند.

(۲) سپس هر نقطه (x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)) به نزدیک‌ترین مرکز خوشه (z_j ($j \in \{1, 2, \dots, K\}$)) تخصیص داده می‌شود. نزدیکی بر اساس فاصله اقلیدسی محاسبه می‌گردد:

رابطه (۴)

$$\|x_i - z_j\| < \|x_i - z_p\| \text{ for } p = 1, 2, \dots, K \text{ and } p \neq j$$

(۳) مراکز خوشه‌ها با میانگین نقاط هر خوشه به‌روزرسانی می‌شوند:

رابطه (۵)

$$z_j^* = \frac{1}{n_i} \sum_{x_i \in C_j} x_i \text{ , } j = 1, 2, \dots, K$$

که در آن n_i تعداد نقاط موجود در خوشه C_j است.

(۴) این فرایند به‌صورت تکراری ادامه می‌یابد تا زمانی که موقعیت مراکز خوشه‌ها ثابت شود:

رابطه (۶)

$$z_j^* = z_j \text{ for } j = 1, 2, \dots, K$$

یا تعداد تکرارها به حد مشخصی برسد.

برای مونتاژ سیکل، به‌جای ترکیب تصادفی ریز سفرها، نمایندگان هر خوشه بر مبنای نزدیکی به مرکز خوشه انتخاب شدند تا نمونه‌های معمول رفتار آن خوشه وارد سیکل شوند و سهم هر خوشه در سیکل نهایی متناسب با حضور آن در داده میدان رعایت گردد. ریز سفرهای هر خوشه برحسب فاصله تا مرکز مرتب شدند و تا رسیدن به طول هدف سیکل، نمونه‌های نزدیک‌تر گزینش گردیدند؛ سپس ریز سفرهای منتخب با حفظ سازگاری‌های فیزیکی پشت سرهم الحاق شدند تا پروفایل نهایی سرعت-زمان شکل گیرد. برای کاهش نویز دو روش هموارسازی Savitzky-Golay و رگرسیون محلی مقاوم (Rloess) بر پروفایل نهایی اعمال و بر اساس مقایسه خطای نسبی شاخص‌های کلیدی نسبت به داده میدان ارزیابی شدند؛ روشی که در بازتولید شاخص‌ها کمترین خطا را نشان می‌داد به‌عنوان هموارسازی نهایی پذیرفته شد.

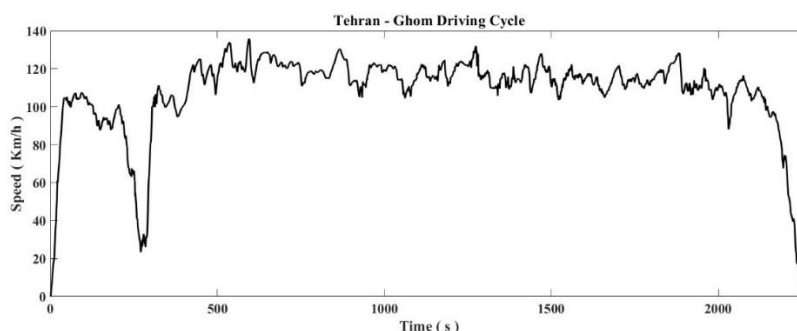
اعتبارسنجی سیکل استخراج‌شده در دو سطح انجام شد. نخست، در سطح شاخص‌ها، برای ویژگی‌های کلیدی از جمله سرعت میانگین، سهم زمان توقف، میانگین شتاب مثبت و منفی، تعداد توقف‌ها و سایر کمیت‌های آماری، اختلاف نسبی بین سیکل نهایی و داده میدان محاسبه شد و برای جمع‌بندی، ریشه میانگین مربعات تفاوت‌ها (RMS) به‌عنوان سنجه کلی انحراف گزارش گردید. معیار پذیرش در این پژوهش، حداکثر دو درصد خطا برای هر پارامتر بود تا اطمینان حاصل شود سیکل ارائه شده نماینده معتبر رفتار رانندگی در مسیرهای هدف است. دوم، در سطح الگوهای توزیعی، نقشه چگالی سرعت-شتاب و هیستوگرام‌های منتخب بین سیکل نهایی و کل داده مقایسه شد تا شباهت الگوی حرکت، فراتر از تطابق مقادیر میانگین، احراز گردد. به‌منظور انتخاب نرم‌افزار مناسب برای پردازش و تحلیل داده‌ها، با توجه به روش‌های ارائه‌شده و آشنایی بیشتر با قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار متلب^۱، از این برنامه استفاده شد. متلب به‌عنوان یک محیط محاسباتی عددی و زبان برنامه‌نویسی چندمنظوره، امکانات گسترده‌ای را برای تحلیل داده‌ها، توسعه الگوریتم‌ها و ایجاد مدل‌ها فراهم می‌آورد.

در نهایت، به‌منظور اطمینان از این که سیکل رانندگی استخراج‌شده به واقعیت نزدیک باشد، درصد خطای قابل‌قبول برای هر پارامتر حداکثر ۲ درصد تعریف گردید. این معیار دقت کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها و پردازش‌های انجام شده، قابلیت اعتماد و اعتبار لازم را دارند.

یافته‌های پژوهش

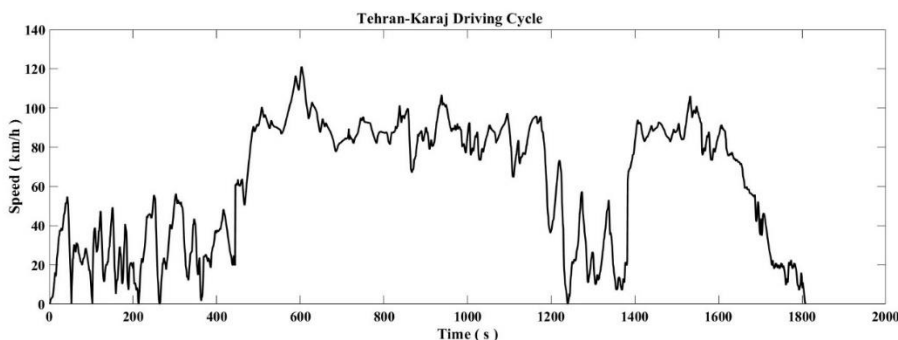
در شکل‌های (۴، ۵ و ۶) به‌ترتیب سیکل‌های بهینه استخراج‌شده آزادراه‌های تهران-قم، تهران-کرج و تهران-ساوه ارائه شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که سیکل رانندگی ایجاد شده دارای نوسانات سرعت قابل‌توجهی است که این نوسانات منجر به تغییرات زیادی در شتاب خودرو می‌شود. دلایل احتمالی این تغییرات می‌تواند شامل ترافیک مقطعی ناشی از عوامل مختلفی نظیر تصادفات، ورودی و خروجی‌های آزادراه، و همچنین حضور دوربین‌های کنترل سرعت و حتی سبک رانندگی متداول در این آزادراه‌ها باشد. این عوامل به‌ویژه در آزادراه‌ها که معمولاً تحت تأثیر متغیرهای مختلف ترافیکی قرار دارند، می‌توانند بر رفتار رانندگی تأثیرگذار باشند و منجر به نوسانات غیرقابل پیش‌بینی در سرعت و شتاب خودروها شوند.

بهینه سیکل آزادراه تهران-قم (TG) به‌عنوان طولانی‌ترین مسیر مورد بررسی با مسافت ۶۲ کیلومتر، میانگین سرعت ۱۰۹ کیلومتر بر ساعت و نسبت زمان رانندگی بیش از ۹۷ درصد، پرسرعت‌ترین سیکل در میان سه آزادراه محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این سیکل از ابتدای مسیر با شتاب مثبت بالا شروع شده و در ادامه نیز تغییرات سرعت نسبتاً ملایمی را تجربه می‌کند. این الگو نشان‌دهنده جریان ترافیکی نسبتاً روان در این مسیر است.



شکل ۴. سیکل رانندگی آزادراه تهران-قم

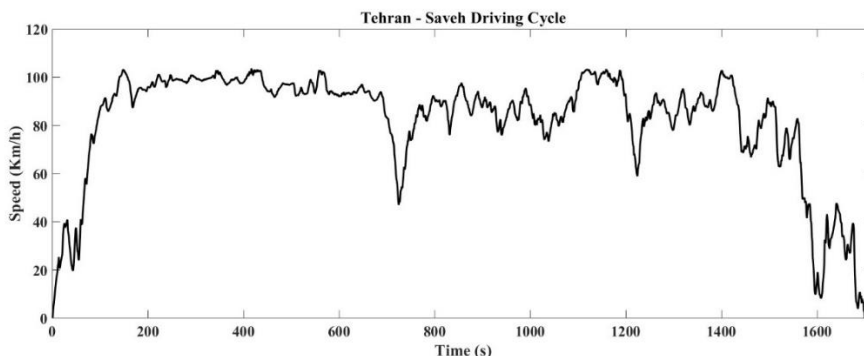
در مقابل، آزادراه تهران-کرج (TK) با طول مسیر ۱۵ کیلومتر و میانگین سرعت ۶۸ کیلومتر بر ساعت، بیشترین تغییرات سرعت را در میان سه سیکل استان تهران دارد (شکل ۵). نوسانات شدید سرعت در این سیکل ناشی از تراکم بالای ترافیک و حجم بالای تردد روزانه در این آزادراه است که در ساعات اوج ترافیک، مانند صبح‌های زود و عصر که ناشی از رفت‌وآمد روزانه افراد به محل کار است، باعث ایجاد شتاب‌های مثبت و منفی متعدد می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که سیکل TK رفتاری پرتنش‌تر و غیرقابل پیش‌بینی‌تر نسبت به TG داشته باشد.



شکل ۵. سیکل رانندگی آزادراه تهران-کرج

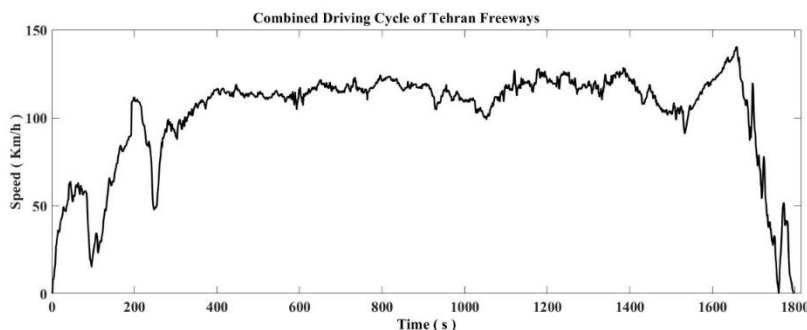
بهینه سیکل آزادراه تهران-ساوه (TS) که ۲۵ کیلومتر طول داشته و میانگین سرعت آن ۸۰ کیلومتر بر ساعت است (شکل ۶)، ویژگی‌های ترکیبی از دو سیکل قبلی را نشان می‌دهد. در ابتدای مسیر، الگو مشابه با آزادراه TG بوده و دارای شتاب اولیه بالا و سرعت

نسبتاً زیاد است، اما در ادامه همانند آزادراه TK نوسانات زیادی در سرعت ثبت شده است. این ترکیب نشان‌دهنده اثر شرایط ترافیکی متغیر و احتمالاً تعامل بین جریان روان مسیر اصلی و گلوگاه‌های ترافیکی مقطعی است.



شکل ۶. سیکل رانندگی آزادراه تهران - ساوه

در نهایت، شکل ۷ سیکل ترکیبی آزادراه‌های تهران - کرج، تهران - قم و تهران - ساوه (TFW) را نشان می‌دهد که از تلفیق داده‌های سه سیکل اصلی به‌دست آمده است. این سیکل با مسافت ۱۰۲ کیلومتر، میانگین سرعت ۸۵/۶ کیلومتر بر ساعت و مدت‌زمان ۱۸۰۰ ثانیه مشخص می‌شود. نسبت زمان رانندگی در این سیکل برابر با ۹۹/۰۵ درصد بوده که نشان‌دهنده تداوم حرکت در بیشتر طول مسیر است. از نظر الگوی تغییرات سرعت، سیکل TFW ویژگی‌های میانه‌ای دارد؛ به‌طوری‌که هم نوسانات زیاد سیکل TK و هم جریان روان تر TG در آن بازتاب یافته است.



شکل ۷. سیکل رانندگی ترکیبی ۳ آزادراه تهران - کرج، تهران - قم و تهران - ساوه (TFW)

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که هر یک از آزادراه‌های استان تهران دارای الگوهای منحصربه‌فردی از رفتار رانندگی هستند. آزادراه TG با سرعت بالا و جریان روان خودروها، تغییرات شتاب نسبتاً ملایمی را تجربه می‌کند، در حالی که آزادراه TK بیشترین نوسانات سرعت و شتاب را دارد و رفتار رانندگی در آن پرتنش‌تر و غیرقابل پیش‌بینی است، به‌ویژه در ساعات اوج ترافیک صبح و عصر که ناشی از رفت‌وآمد روزانه است. TS ترکیبی از دو الگوی یاد شده را نشان می‌دهد؛ مسیر با شتاب اولیه بالا آغاز می‌شود و در ادامه دچار نوسانات قابل‌توجه سرعت می‌شود. سیکل ترکیبی سه آزادراه TFW نمایانگر میانگینی از رفتار رانندگی در این مسیرهاست و برای تحلیل‌های کلان و مدل‌سازی جریان ترافیک و آلاینده‌ها مناسب است. این نتایج تأکید می‌کنند که حتی در یک شبکه آزادراهی واحد، تفاوت‌های معناداری در الگوی رانندگی وجود دارد و این تفاوت‌ها باید به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد. افزون بر این، چرخه‌های استخراج شده به‌ویژه TFW با فراهم کردن ورودی‌های بومی و دقیق برای مدل‌های برآورد انتشار مانند IVE، می‌توانند خطای محاسبات انتشار و مصرف سوخت را کاهش دهند و بدین‌وسیله از سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی مبتنی بر شواهد پشتیبانی کنند.

بحث

یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه آن است که سیکل‌های رانندگی ثبت شده در آزادراه‌های تهران (TK, TG, TS و TFW) در بسیاری از شاخص‌های عملکردی تفاوت قابل توجهی با سیکل‌های استاندارد بین‌المللی دارند. به عنوان نمونه، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در سیکل TK میانگین شتاب مثبت و منفی تقریباً دو برابر چرخه HWFET بود، که نشان‌دهنده رانندگی پرتنش‌تر در آزادراه‌های تهران است. این نتیجه در مقایسه با مطالعات مشابه (EPA, 2014; Fotouhi & Montazeri-Gh, 2013) نیز تأیید می‌شود و می‌تواند ناشی از شرایط خاص ترافیکی، سبک رانندگی و الگوهای رفت‌وآمد روزانه در این آزادراه‌ها باشد.

همچنین، نتایج نشان داد که سیکل‌های آزادراهی تهران از نظر میانگین سرعت، شباهت بیشتری به سیکل‌های ترکیبی دارند تا سیکل‌های بزرگراهی استاندارد مانند HWFET. این شباهت نشان می‌دهد که رانندگی در آزادراه‌های تهران به دلیل وجود ترافیک‌های مقطعی و تغییرات ناگهانی در جریان ترافیک، ترکیبی از رفتار رانندگی بزرگراهی و شهری را منعکس می‌کند. مقایسه با چرخه ECE+EUDC نیز نشان داد که باوجود شباهت در حداکثر سرعت، میزان حرکات شتاب‌دار در سیکل اروپایی به‌طور معناداری بیشتر است، که این اختلاف احتمالاً ناشی از سرعت پایین‌تر متوسط در این سیکل در مقابل سرعت‌های بالاتر در آزادراه‌های تهران است.

از سوی دیگر، مقایسه با سیکل‌های NEDC و WLTC حاکی از آن است که اگر چه سیکل TG از نظر حداکثر سرعت به این سیکل‌ها نزدیک است، اما حرکات شتاب‌دار بسیار کمتری را تجربه می‌کند. چنین تفاوتی می‌تواند به دلیل روان‌تر بودن جریان ترافیک در مسیرهای انتخاب شده در تهران باشد. زیرا، نسبت زمان رانندگی در این سیکل‌ها بیش از ۹۷ درصد ثبت شده است. این موضوع نشان‌دهنده تفاوت بنیادی با شرایط شهری پرتراffic اروپا و برخی مطالعات آسیایی (UNECE 2013; Zhao et al., 2018) است.

مقایسه با سیکل‌های غیراستاندارد نیز شواهد مهمی ارائه کرد. سیکل درون‌شهری تهران، همان‌طور که انتظار می‌رفت، به دلیل تراکم بالای ترافیک میانگین شتاب بیشتری دارد و سرعت متوسط پایین‌تری را نشان می‌دهد. در مقابل، سیکل تهران-آمل از نظر حداکثر سرعت شباهت بالایی با سیکل‌های TK و TFW دارد حدود (۱۲۳ کیلومتر بر ساعت)، اما به دلیل توقف‌های بیشتر و نسبت زمان رانندگی پایین‌تر، میانگین شتاب مثبت و منفی آن تقریباً ده برابر بیشتر از TG است (قراآتی و همکاران، ۱۴۰۰).

این یافته با مطالعات مشابه نیز همخوانی دارد و بیانگر اثر توپوگرافی و شرایط جاده‌ای متفاوت بر رفتار رانندگی است. علاوه بر این، سیکل SDC1 نیز رانندگی پرتنش‌تری نسبت به سیکل‌های آزادراهی تهران نشان داد و تعداد حرکات شتاب‌دار آن تا ۹ برابر بیشتر از سیکل‌های ترکیبی بود (Samuel et al., 2002).

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که سیکل‌های آزادراهی تهران دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که در هیچ یک از سیکل‌های استاندارد بین‌المللی بازتاب کامل ندارند. این مسئله نشان می‌دهد استفاده مستقیم از سیکل‌های استاندارد برای ارزیابی آلاینده‌گی یا مصرف سوخت خودروها در ایران می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی شود.

با وجود محدودیت‌هایی مانند تمرکز بر سه آزادراه اصلی و پوشش زمانی تابستان و پاییز ۱۴۰۳ ساعت‌های ۶ تا ۲۲، این مطالعه برای نخستین بار چرخه‌های رانندگی آزادراهی پیرامون تهران را به‌صورت مستقل و داده محور استخراج و تحلیل می‌کند. داده‌ها در بازه زمانی مشخص و بر سه آزادراه گردآوری شده‌اند. از این‌رو، تغییرات فصلی و الگوهای هفتگی ترافیک و نیز تفاوت‌های محلی سایر شهرها می‌تواند بر شاخص‌های چرخه اثر بگذارد که از اصلی‌ترین محدودیت‌های این پژوهش می‌باشد. با این حال، حجم مناسب داده‌های میدانی و رویه نظام‌مند مبتنی بر ریز سفرها، خوشه‌بندی میانگین-کی و طراحی چرخه ترکیبی، چرخه‌هایی نماینده و پایدار برای شرایط آزادراهی تهران فراهم کرده است. چارچوب ارائه‌شده بازتولیدپذیر است و می‌تواند برای کالیبراسیون و بهبود دقت مدل‌های محاسبه آلاینده‌گی و مصرف سوخت در تهران و شهرهای با شرایط مشابه به کار رود. همچنین با نمونه‌برداری تکمیلی در فصل‌ها، روزهای مختلف هفته یا شهرهای دیگر، امکان تولید چرخه‌های بومی متناظر و ثبت شفاف حساسیت نتایج فراهم می‌شود.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای سیکل رانندگی TFW با سیکل‌های استاندارد و غیراستاندارد

پارامتر سیکل	TFW یافته‌های تحقیق	TK یافته‌های تحقیق	TG یافته‌های تحقیق	TS یافته‌های تحقیق	HWFET (EPA, 2014)	TEHRAN (Fotouhi & Montazeri-Gh, 2013)	ECE+EUDC (Barlow et al., 2009)	NEDC (UNECE, 2013)	WLTC (Zhao et al., 2018)	TEHRAN-AMOL (قرائتی و همکاران، ۱۴۰۰)	SDC (Samuel et al., 2002)
زمان (s)	۱۸۰۰	۱۸۱۰	۲۲۴۹	۱۷۰۰	۷۶۵	۱۵۳۳	۱۲۲۵	۱۱۸۰	۱۸۰۰	۱۸۶۸	۱۷۹۸
فاصله (km)	۱۰۲	۱۵	۶۲	۲۵	۱۶/۴۵	۱۴/۴۱	۱۰/۸۷	-	-	-	-
حداکثر سرعت (km/h)	۱۳۴	۱۲۱	۱۳۵	۱۰۴	۹۶/۵۷	۹۱/۰۶	۱۱۹/۳۰	۱۲۰/۰۹	۱۲۱/۳۰	۱۲۳/۲۳	۱۰۰/۸
میانگین سرعت (km/h)	۹۲/۰۵	۶۷/۵	۱۱۱/۷۵	۷۹/۳۲	۷۷/۷	۳۳/۸۳	۳۱/۹۱	۳۰/۶۰	۴۶/۵۰	۲۵/۰۵	۳۲/۹۰
میانگین سرعت هنگام رانندگی (km/h)	۹۳/۰۹	۶۹/۱۵	۱۱۱/۸۱	۸۰/۸۳	۷۷/۷۶	-	-	۴۲/۲۴	۵۳/۱۴	۳۰/۲۶	۳۷/۰۳
میانگین شتاب (m/s ²)	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۲۰۷	۰/۳۱	۰/۱۵۷	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۴۲	۱/۹۶	۲/۰۱۲
میانگین شتاب منفی (m/s ²)	-۰/۳۲۴	-۰/۳۹	-۰/۲۶	-۰/۳۴	-۰/۱۸	-۰/۴۹	-۰/۷۸	-۰/۷۲	-۰/۷۷	-۱/۷۹	-۲/۰۴
(%) نسبت زمان رانندگی	۹۸/۸۸	۹۷/۵۰	۹۹/۹۳	۹۸/۱۳	۹۹/۸۷	۸۴/۷۴	۷۲/۳۳	۷۹/۵۸	۸۷/۵۰	۸۲/۸۰	۸۸/۸۷
(%) نسبت زمان توقف	۱/۱۲	۲/۵۰	۰/۰۷	۱/۸۷	۰/۱۳	۱۵/۲۶	۲۷/۶۷	۲۰/۴۲	۱۲/۵۰	۱۷/۲۰	۱۱/۱۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهارچرخه TS, TG, TK و TFW برای آزادراه‌های تهران استخراج و با چرخه‌های استاندارد و غیراستاندارد مقایسه شدند. یافته‌ها نشان داد که TS با وجود میانگین سرعت نسبتاً بالا، الگوی شتاب‌گیری ملایم‌تری نسبت به چرخه‌های مشابه دارد. همچنین، TG بیشترین هم‌پوشانی را از نظر حداکثر سرعت با چرخه‌های بین‌المللی نظیر WLTC و NEDC نشان داد، اما به دلیل سهم اندک زمان توقف، الگوی حرکتی روان‌تری را بازتاب می‌دهد. از سوی دیگر، TK رفتار رانندگی پرتنش‌تری نسبت به چرخه‌هایی مانند HWFET دارد؛ به گونه‌ای که میانگین شتاب‌های مثبت و منفی آن تقریباً دو برابر گزارش شد.

در پایان، چرخه TFW به عنوان چرخه‌ای ترکیبی مبتنی بر داده‌های میدانی، بازنمایی جامع‌تری از شرایط واقعی رانندگی در آزادراه‌های تهران ارائه می‌کند. این چرخه، ضمن نزدیکی بیشتر به رفتار واقعی رانندگان، قابلیت بالاتری برای به کارگیری در مدل‌سازی مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها نسبت به چرخه‌های استاندارد بین‌المللی دارد. بر این اساس، نتایج بر ضرورت توسعه و استفاده از چرخه‌های رانندگی بومی، به ویژه TFW، برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد خودروها در شرایط ترافیکی ایران تأکید می‌کند.

هدف این پژوهش، تعیین چرخه‌های رانندگی بومی نماینده برای کالیبراسیون و بهبود دقت مدل‌های برآورد انتشار و مصرف سوخت بود. تمرکز بر تولید چرخه‌های واقعی آزادراهی تهران TS, TG, TK و یک چرخه ترکیبی TFW قرار گرفت تا به عنوان زیرساخت اجرای مدل‌های آلودگی هوای منابع متحرک، از جمله مدل IVE، به کار گرفته شوند. بدین ترتیب، چرخه‌های پیشنهادی مستقیماً برای خوراک‌دهی و کالیبراسیون مدل‌های انتشار استفاده می‌شوند و با نزدیک‌سازی الگوی سرعت/شتاب به شرایط واقعی، خطای برآورد انتشار و مصرف سوخت کاهش می‌یابد. بنابراین، خروجی اصلی این کار «چرخه‌های نماینده برای مدل‌های انتشار» است و پیامد ثانویه آن، بهبود دقت برآوردها و پشتیبانی از سیاست‌گذاری محیط‌زیستی است. در این مطالعه، کاهش انتشار به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده است. تفاوت‌های مشاهده شده بین رفتار رانندگان و چرخه‌های خارجی استاندارد، اهمیت محاسبه چرخه رانندگی بومی برای هر کشور یا منطقه را برجسته می‌سازد و نیاز به توجه به ویژگی‌های خاص هر منطقه را در تحلیل‌های انتشار و سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی مبتنی بر شواهد پررنگ‌تر می‌کند.

پیشنهادهای

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در زمینه یادگیری ماشین، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده از این روش بهره‌برداری شود. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود فرایند شناسایی و تحلیل سیکل‌های رانندگی داشته باشد. این رویکرد نه تنها دقت و کارآمدی تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه امکان پردازش داده‌های بزرگ و متنوع را نیز فراهم می‌کند. همین‌طور پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش‌های ترکیبی نیز برای مقایسه و بهینه‌سازی نتایج مورد استفاده قرار گیرند. این امر می‌تواند مسیر جدیدی برای توسعه سیستم‌های هوشمند تحلیل سیکل‌های رانندگی ایجاد کند و علاوه بر این امکان پیش‌بینی سیکل رانندگی در آینده را نیز فراهم می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

مشارکت نویسندگان

خسرو اشرفی: روش‌شناسی، اعتبارسنجی داده‌ها و تحلیل رسمی. سجاد حکیمی: اعتبارسنجی داده‌ها، تحلیل رسمی، منابع داده، نرم‌افزار و نگارش. امیرحسین مریخ: اعتبارسنجی داده‌ها، تحلیل رسمی، منابع داده، نرم‌افزار و نگارش. آرش کوهی: منابع داده. میلاد صابری: نرم‌افزار. همه نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و با انتشار آن موافقت کرده‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی (ندارد)

پژوهش حاضر بدون حمایت مالی انجام شده است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از معاونت آموزشی و پژوهشی دانشکده محیط‌زیست دانشگاه به علت تصویب موضوع این پژوهش به‌عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد تشکر و قدردانی می‌کنند. نویسندگان مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که از ChatGPT به‌صورت محدود برای کمک به یافتن منابع مرتبط با پیشینه پژوهش استفاده شده است. تمامی منابع و اطلاعات پیشنهادی در نهایت توسط نویسندگان بررسی و راستی‌آزمایی شده و مسئولیت نهایی محتوای مقاله بر عهده نویسندگان است.

منابع

- آزادی، محمد؛ دزیانین، شکوه؛ نوی، علیرضا؛ سلمانی، علیرضا؛ قرائتی، تابانمهر، و فرجی، علی (۱۴۰۱). توسعه یک چرخه رانندگی براساس داده‌های ضبط‌شده از یک خودروی هیبرید بنزینی-الکتریکی در دو مسیر از شهر تهران با الگوریتم میانگین کی. فصلنامه علمی کارافن، ۱۹ (۱)، ۶۲۹-۶۵۲. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.315133.1840>
- قراستی، تابان مهر؛ مومنی موحد، علی؛ آزادی، محمد، و موسویان، سید اشکان (۱۴۰۰). مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و میانگین کی در استخراج چرخه واقعی رانندگی ترکیبی تهران-آمل. نشریه مهندسی مکانیک/میرکبیر، ۵۳ (۹)، ۵۰۱۷-۵۰۳۶. <https://doi.org/10.22060/mej.2021.19222.6980>

- ملک‌پور اسطلکی؛ مریم، احمدی، و ارکمی، علی (۱۴۰۱). تعیین سیکل رانندگی در ساعت پیک صبحگاهی شهر رشت. دهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار، تهران. <https://civilica.com/doc/1620782>
- مهرقرائتی، تابان؛ مومنی موحد، علی؛ آزادی، محمد؛ موسویان، سید اشکان، و نیکخواه، حسین (۱۳۹۸). مقایسه پارامترهای مشخصه چرخه رانندگی با استفاده از داده‌های واقعی جمع‌آوری شده در ایران و چرخه‌های استاندارد جهانی. یازدهمین همایش بین‌المللی موتورهای درونسوز و نفت، تهران. <https://civilica.com/doc/1015542>
- میرشی، سمیرا؛ عنایتی آهنگر، فراز، و حسینی، وحید (۱۳۹۱). بررسی تأثیر الگوی رانندگی بر میزان آلاینده‌ی تولیدی توسط خودروها در شهر تهران. دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران. <https://civilica.com/doc/200686>

References

- Abu Mallouh, M., Surgenor, B. W., Abdelhafez, E., Salah, M., & Hamdan, M. (2014). Development of a driving cycle for Amman City with performance evaluation for ICE vehicle. In *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* (Paper No. ESDA2014-20600, V001T02A022). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/ESDA2014-20600>
- Al-Samari, A. (2017). Real-world driving cycle: Case study of Baqubah, Iraq. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 39-47. <https://doi.org/10.24237/djes.2017.10204>
- Azadi, M., Dezhianian, S., Navi, A., Salmani, A., Qaraati, T., & Faraji, A. (2022). Development of a driving cycle based on data recorded from an electric-gasoline hybrid vehicle on two routes in Tehran city with K-means algorithm. *Karafan Journal*, 19(1), 629-652. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.315133.1840> [in Persian]
- Chen, P., Tong, R., Lu, G., & Wang, Y. (2018). Exploring travel time distribution and variability patterns using probe vehicle data: Case study in Beijing. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1), 3747632. <https://doi.org/10.1155/2018/3747632>
- Fotouhi, A., & Montazeri-Gh, M. (2013). Tehran driving cycle development using the K-means clustering method. *Scientia Iranica*, 20(2), 286-293.
- Frey, H. C., Unal, A., Roupail, N. M., & Colyar, J. D. (2003). On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(8), 992-1002. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466245>
- Fruin, S., Westerdahl, D., Sax, T., Sioutas, C., & Fine, P. M. (2008). Measurements and predictors of on-road ultrafine particle concentrations and associated pollutants in Los Angeles. *Atmospheric Environment*, 42(2), 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.057>
- Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamotheu, R. B. (2021). Driving cycles for estimating vehicle emission levels and energy consumption. *Future Transportation*, 1(3), 615-638. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1030033>
- Geetha, A., & Subramani, C. (2019). Development of driving cycle under real-world traffic conditions: A case study. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(6), 4798-4803. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i6.pp4798-4803>
- Ho, S.-H., Wong, Y.-D., & Chang, V. W.-C. (2014). Developing Singapore driving cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions. *Atmospheric Environment*, 97, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.042>
- Huang, C., Lou, D., Hu, Z., Feng, Q., Chen, Y., Chen, C., Tan, P., & Yao, D. (2013). A PEMS study of the emissions of gaseous pollutants and ultrafine particles from gasoline- and diesel-fueled vehicles. *Atmospheric Environment*, 77, 703-710. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.059>
- Huzayyin, O. A., Salem, H., & Hassan, M. A. (2021). A representative urban driving cycle for passenger vehicles to estimate fuel consumption and emission rates under real-world driving conditions. *Urban Climate*, 36, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100810>
- Jing, Z., Wang, G., Zhang, S., & Qiu, C. (2017). Building Tianjin driving cycle based on linear discriminant analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.005>
- Kaymaz, H., Korkmaz, H., & Erdal, H. (2019). Development of a driving cycle for Istanbul bus rapid transit based on real-world data using stratified sampling method. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.023>
- Maulik, U., & Bandyopadhyay, S. (2000). Genetic algorithm-based clustering technique. *Pattern Recognition*, 33(9), 1455-1465. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00137-5)
- Malekpour Astalaki, M., & Ahmadi Arkami, A. (2022). Determination of the driving cycle during the morning peak hour in Rasht city. 10th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development, Tehran. <https://civilica.com/doc/1620782> [in Persian]
- Mehrgharaati, T., Momeni Movahed, A., Azadi, M., Mousavian, S. A., & Nikkhah, M. (2019). Comparing characteristic parameters of driving cycle using real data collected in Iran and global standard cycles. *11th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil*. <https://civilica.com/doc/1015542> [in Persian]
- Mirshi, S., Enayati Ahangar, F., & Hosseini, V. (2012). Investigation of the effect of driving patterns on vehicle emissions in Tehran. *12th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran*. <https://civilica.com/doc/200686> [in Persian]
- Nie, F., Li, Z., Wang, R., & Li, X. (2022). An effective and efficient algorithm for K-means clustering with new formulation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(4), 3433-3443. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2022.3155450>
- Pathak, S. K., Sood, V., Singh, Y., & Channiwal, S. A. (2016). Real-world vehicle emissions: Their correlation with

- driving parameters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 157-176. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.001>
- Qaraati, T., Momeni Movahed, A., Azadi, M., & Moosavian, S. A. (2021). Comparison of support vector machine and K-means algorithms performance in extracting the real driving cycle of combined Tehran-Amol. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(9), 5017-5036. <https://doi.org/10.22060/mej.2021.19222.6980> [in Persian]
- Qiu, D., Li, Y., & Qiao, D. (2018). Recurrent neural network based driving cycle development for light duty vehicles in Beijing. *Transportation Research Procedia*, 34, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.026>
- Samuel, S., Austin, L., & Morrey, D. (2002). Automotive test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels - a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 216(7), 555-564. <https://doi.org/10.1243/095440702760178587>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). Light-duty automotive technology, carbon dioxide emissions, and fuel economy trends: 1975 through 2014. Washington, DC.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2013). Development of a world-wide harmonized light duty driving test cycle (WLTC). Geneva.
- Vanhulsel, M., Degraeuwe, B., Beckx, C., Vankerkom, J., & De Vlieger, I. (2014). Road transportation emission inventories and projections – case study of Belgium: Methodology and pitfalls. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 27, 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.002>
- Wang, Q., Huo, H., He, K., Yao, Z., & Zhang, Q. (2008). Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(5), 289-297. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003>
- Zähringer, M., Kalt, S., & Lienkamp, M. (2020). Compressed driving cycles using Markov chains for vehicle powertrain design. *World Electric Vehicle Journal*, 11(3), 52. <https://doi.org/10.3390/wevj11030052>
- Zhang, M., Shi, S., Lin, N., & Yue, B. (2018). High-efficiency driving cycle generation using a Markov chain evolution algorithm. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1288-1301. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2887063>
- Zhao, J., Gao, Y., Guo, J., & Chu, L. (2018). The creation of a representative driving cycle based on intelligent transportation system (ITS) and a mathematically statistical algorithm: A case study of Changchun (China). *Sustainable Cities and Society*, 42, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.031>