Extraction and optimization of the Semnan city driving cycle with the aim of reducing fuel consumption in passenger cars using a genetic algorithm

Mohammad Parsa Shahabiniya[1], Mohammad Hossein Khalesi[1], Shahaboddin Kharazmi[1*], Hadi Kamalzadeh[1], Maede Majidi Majd[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
[2] Faculty of Mathematics, Statistics, and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT

Standard driving cycles often fail to accurately represent real-world urban traffic conditions, leading to considerable uncertainties in fuel consumption estimation and vehicle energy-performance assessment. In this study, a data-driven framework is proposed for the extraction and optimization of a real-world driving cycle for Semnan City with the objective of reducing passenger-car fuel consumption. More than 3,000 km of urban driving data were collected using a Global Positioning System - based acquisition platform. Following data preprocessing, a representative driving cycle was developed using the micro-trip approach and K-means clustering, and its dynamic characteristics, including speed, acceleration, and stop-time distributions, were comprehensively analyzed. Subsequently, a genetic algorithm was employed to rearrange micro-trips and smooth the speed–time profile while preserving the overall driving behavior. Fuel consumption was evaluated using a model derived from chassis dynamometer test results obtained under the New European Driving Cycle (NEDC) for a Peugeot 207 automatic passenger vehicle. The results demonstrated that the optimized driving cycle reduced fuel consumption from 7.02 to 6.58 L/100 km while maintaining the essential characteristics of real-world driving. The proposed framework highlights the effectiveness of integrating real driving data with intelligent optimization techniques to develop localized driving cycles and improve vehicle energy efficiency. Furthermore, the methodology can be extended to other urban environments for fuel consumption analysis, emission studies, and sustainable transportation planning.

KEYWORDS

Driving cycle, Fuel consumption, Optimization, Driving behavior, Semnan

ACCEPTED MANUSCRIPT

* Corresponding Author: Email: kharazmi@semnan.ac.ir

1. Introduction

Increasing fuel consumption, environmental pollution, and dependence on fossil fuels are major challenges facing the transportation sector [1]. Road transportation, particularly gasoline-powered passenger cars, accounts for a significant share of energy consumption and greenhouse gas emissions [2–4]. Although standard driving cycles, such as the New European Driving Cycle (NEDC) and Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC), are widely used to evaluate vehicle fuel consumption, they cannot always accurately represent real-world driving conditions due to variations in traffic, road geometry, and driver behavior [5–9]. Therefore, developing local driving cycles based on actual driving data is essential for more reliable fuel consumption assessment. Recent advances in Global Positioning System (GPS) technology and data acquisition systems have facilitated the collection of real-world driving data. These data can be used to identify driving patterns and develop representative urban driving cycles. Furthermore, metaheuristic optimization algorithms, particularly Genetic Algorithms (GAs), provide effective tools for optimizing driving cycle characteristics while considering multiple objectives and physical constraints [10,11]. However, integrating real-world driving data, driving cycle development, and fuel consumption optimization within a unified framework remains a significant research challenge. Semnan is considered a suitable case study for investigating urban driving behavior and developing a representative local driving cycle. Although previous studies have investigated driving patterns and driving cycle development in several Iranian cities, including Semnan [12–14], further research is required to integrate driving cycle optimization with fuel consumption assessment.

Accordingly, this study proposes a comprehensive data-driven framework for developing and optimizing the driving cycle of Semnan. The main novelty lies in combining real-world GPS data, Genetic Algorithm-based micro-trip rearrangement, and fuel consumption evaluation using NEDC test results. The proposed approach aims to reduce fuel consumption while preserving the essential characteristics of real-world driving behavior, particularly travel time and dominant driving patterns.

2. Methodology

This study investigates the development and optimization of a representative driving cycle for Semnan, Iran, using a Genetic Algorithm (GA) to evaluate its effect on fuel consumption. Real-world driving data were collected over a total distance of 3,000 km during four months using a smartphone-based GPS Logger application. Recorded parameters included geographic coordinates, vehicle speed, altitude, and time. The collected data were processed to extract driving characteristics, including total travel distance, driving and stopping times, acceleration and deceleration durations, average speeds, mean positive and negative accelerations, and the number of stops. These indicators were used to characterize actual driving behavior.

The driving data were divided into micro-trips, each defined as the vehicle movement between two consecutive zero-speed points. K-means clustering was employed to classify the extracted data, and the optimal number of clusters was determined using the Elbow method. Based on the resulting analysis, four clusters were selected to represent the dominant driving patterns [15].

To evaluate fuel consumption, experimental results from the NEDC test of a Peugeot 207 automatic passenger car were used. The test was conducted under controlled laboratory conditions using a chassis dynamometer, and the resulting data were employed to develop a data-driven fuel consumption model based on vehicle speed and acceleration [4]. The developed model was subsequently applied to the original Semnan driving cycle to estimate its baseline fuel consumption. Finally, a GA-based optimization procedure was implemented to rearrange micro-trips and minimize total fuel consumption. The optimization process maintained the total cycle duration and considered physical and driving-related constraints, including acceleration limits and stopping characteristics. Since the objective was to develop a representative driving cycle rather than reproduce a specific geographical route, spatial continuity between consecutive micro-trips was not imposed. However, each micro-trip began and ended at zero speed, and a smoothing procedure was applied after optimization to ensure dynamic continuity of the final speed profile. All data processing, fuel consumption modeling, and optimization procedures were implemented in Python.

3. Results and Discussion

The analysis of real-world driving data revealed that urban driving in Semnan is characterized by frequent stop-and-go patterns, low-to-medium average speeds, and considerable acceleration fluctuations. The extracted driving cycle, shown in Figure 1, represents

ACCEPTED MANUSCRIPT

the dominant characteristics of actual urban driving, including speed variations, acceleration phases, and stopping periods. To eliminate unrealistic fluctuations while preserving the overall driving pattern, the Savitzky–Golay filter was applied, resulting in a smoother speed profile, as illustrated in Figure 2.

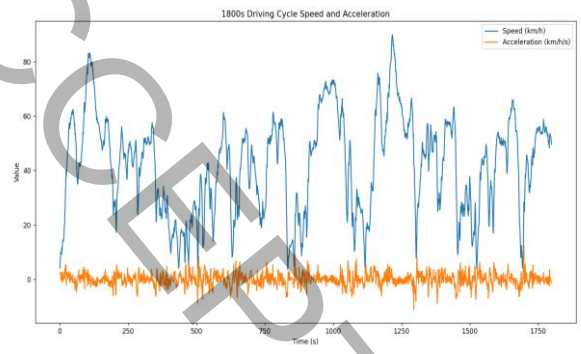


Figure 1. Driving cycle developed in the present study for the city of Semnan.

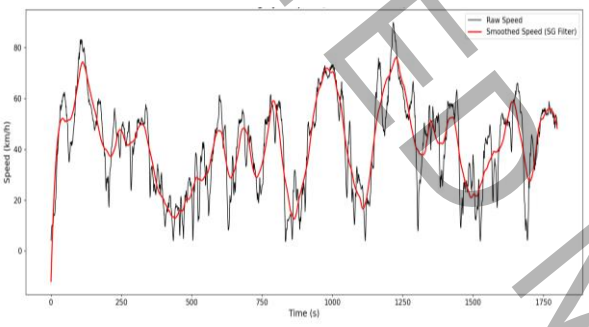


Figure 2. Smoothing of the Semnan driving cycle using the Savitzky–Golay filter.

Following the development of the initial driving cycle, the Genetic Algorithm was employed to rearrange micro-trips and minimize estimated fuel consumption while maintaining the total cycle duration and considering dynamic constraints. The comparison between the initial and optimized cycles indicated a reduction in speed variations and acceleration intensity. As presented in Table 5, the total cycle duration remained unchanged at 1,800 s, while the average positive acceleration decreased from 1.80 to 1.60 m/s² and the magnitude of average negative acceleration decreased from 1.70 to 1.50 m/s².

The estimated fuel consumption decreased from 7.02 to 6.58 L/100 km, corresponding to a 6.27% reduction. Meanwhile, the total driving distance decreased from 20.90 to 18.60 km. Therefore, the observed improvement represents the estimated fuel-saving potential associated with the optimized driving pattern and does not necessarily indicate lower fuel consumption over an identical travel distance. It should also be noted that fuel consumption was estimated using a data-driven model derived from NEDC test results rather than direct real-world fuel measurements. Overall, the findings demonstrate the potential of GA-based micro-trip rearrangement to improve driving cycle characteristics and reduce estimated fuel consumption while preserving the total travel time.

4. Conclusions

This study presented a data-driven framework for developing and optimizing a representative urban driving cycle for Semnan, Iran, with the aim of reducing passenger-car fuel consumption. The driving cycle was derived from real-world GPS data collected across the urban road network. Following the analysis of its dynamic characteristics, a Genetic Algorithm (GA) was applied to optimize the cycle through micro-trip rearrangement. The results revealed that urban driving in Semnan is characterized by frequent stop-and-go events, acceleration, and braking, which are among the major factors contributing to increased fuel consumption. The optimization process produced a smoother speed–time profile, reduced acceleration fluctuations, and improved the dynamic characteristics of the driving cycle. Fuel consumption evaluation, based on a data-driven model developed using NEDC test results, indicated a decrease from 7.02 to 6.58 L/100 km, corresponding to a 6.27% reduction compared with the original cycle. These findings demonstrate the potential of optimizing driving cycle structure to improve energy efficiency and reduce estimated fuel consumption while maintaining the overall cycle duration. The proposed framework, which integrates real-world driving data with intelligent optimization techniques, can also be adapted to other cities. It may provide a useful methodological basis for further studies on driving cycle optimization, energy consumption, vehicle emissions, and sustainable transportation strategies.

5. References

[1] Huzayyin OA, Salem H, Hassan MA. A representative urban driving cycle for passenger vehicles to estimate fuel consumption and emission rates under real-world driving conditions. Urban Climate. 2021 Mar 1;36:100810. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100810

[2] S. Kharazmi, MP. Shahabiniya, M. Jafari, "Simulation and performance analysis of MPI and GDI fuel supply systems in the TU5P engine", Proceedings of the 21st Conference on Fluid Dynamics, Bushehr, 2024. Available: https://civilica.com/doc/2251502

ACCEPTED MANUSCRIPT

[3] S. Kharazmi, M. Sheykhi, M. P. Shahabiniya, "Experimental analysis, turbocharger matching and simulation of the performance of a diesel engine", Available at SSRN 5521545, 2023. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5521545

[4] M. P. Shahabiniya, M. H. Khalesi, H. Derakhshan, A. Barimani, M. M. Majd, S. M. Safy, "Predicting passenger vehicle emissions under real driving conditions using artificial neural networks", Proceedings of the 14th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, 2025. https://civilica.com/doc/2588080/

[5] Sennefelder RM, Micek P, Martín-Clemente R, Risquez JC, Carvajal R, Carrillo-Castrillo JA. Driving cycle synthesis, aiming for realness, by extending real-world driving databases. Ieee Access. 2022 May 16;10:54123-35.

[6] C. Nitoiu, C. Cofaru, M. Popescu, "Influence of road and traffic conditions on emissions and fuel consumption of light vehicles in a real urban driving cycle", Environmental Science and Pollution Research, 1–6 (2025). https://doi.org/10.1007/s11356-025-36573-3

[7] E. Bagheri, M. M. Tehrani, M. Azadi, A. Moosavian, "Impact of driving characteristic parameters and vehicle type on fuel consumption and emissions performance over real driving cycles", PLoS One 20(1), e0317098 (2025). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317098

[8] C. Armenta-Déu, "Environmental impact of urban surface transportation: Influence of driving mode and drivers' attitudes", Pollutants 5(1), 5 (2025). https://doi.org/10.3390/pollutants5010005

[9] G. Lee, J. Yeon, N. Kim, S. Park, "A comprehensive methodology for developing and evaluating driving cycles for electric vehicles using real-world data", eTransportation 24, 100409 (2025). https://doi.org/10.1016/j.etran.2025.100409

[10] Cui Y, Zou F, Xu H, Chen Z, Gong K. A novel optimization-based method to develop representative driving cycle in various driving conditions. Energy. 2022 May 15;247:123455. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123455

[11] A. Kharrazian, M. Saffari, H. Abdi,"Impact of drivers' behavior on real-driving fuel consumption and emissions performance based on clustering analysis",*Transportation Research Part D: Transport and Environment* 99, 103019 (2021). https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103019

[12] Khalesi M H, Hajialimohammadi A, Shahabiniya M P, Kamalzadeh H, Davari dolatabadi A. Extraction of the Driving Cycle of Semnan Urban Buses Using the K-Means Clustering Algorithm and Data Smoothing of Urban Fleet Data with the Savitzky–Golay Filter. Engine. 2026;():e738621 (In Persian). https://10.22034/er.2026.2079799.1122

[13] Mohammadsadeghi F, Azadi M, Masih Tehrani M, Malekan A, Keshavarzi A, Saeidi Googarchin H. Clustering and smoothing using real data collected from city buses to extract the driving cycle in Kermanshah city. Engine. 2024;71(2):1-17 (In Persian). https://10.22034/er.2024.2025374.1042

[14] Shahabiniya MP, Davari Dolatabadi A, Khalesi MH. Development of a Local Driving Cycle for Semnan City Based on Real-World Urban Diesel Bus Fleet Data. The 14th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil; 2025 Sep 4. https://civilica.com/doc/2588030/

[15] Driving Cycle Extraction of Tehran City's West Region for a Car with Turbocharged Engine using Microtrip Clustering Method. Engine. 2019;55(55):3-12 (In Persian).

ACCEPTED MANUSCRIPT

استخراج و بهینه سازی چرخه رانندگی شهر سمنان با هدف کاهش مصرف سوخت در خودرو های سواری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد پارسا شهابی نیا[1]، محمد حسین خالصی[1]، شهاب الدین خوارزمی[1*]، هادی کمال زاده[1]، مائده مجیدی مجد[2]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

چرخه های رانندگی استاندارد به دلیل ناتوانی در بازنمایی دقیق شرایط واقعی ترافیک شهری، همواره با محدودیت هایی در برآورد مصرف سوخت و ارزیابی عملکرد انرژی خودروها مواجه هستند. در این پژوهش، یک چارچوب داده محور برای استخراج و بهینه‌سازی چرخه رانندگی واقعی شهر سمنان با هدف کاهش مصرف سوخت خودروهای سواری ارائه شده است. داده‌های رانندگی از طریق سامانه موقعیت یابی جهانی و در قالب بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر پیمایش شهری جمع‌آوری شد. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، چرخه رانندگی با استفاده از روش ریزسفر و خوشه‌بندی میانگین کی استخراج و ویژگی‌های دینامیکی آن شامل سرعت، شتاب و زمان توقف تحلیل گردید. سپس با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، فرآیند بازآرایی ریزسفرها به منظور هموارسازی پروفایل سرعت - زمان و کاهش نوسانات دینامیکی انجام شد. ارزیابی مصرف سوخت بر اساس مدل توسعه‌یافته از نتایج آزمون استاندارد چرخه جدید رانندگی اروپا برای خودروی پژو ۲۰۷ اتوماتیک صورت گرفت. نتایج نشان داد که چرخه بهینه‌شده ضمن حفظ واقع‌گرایی رفتار رانندگی، موجب کاهش مصرف سوخت از ۷/۰۲ به ۶/۵۸ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر شده است. یافته های این پژوهش بیانگر ظرفیت بالای روش های هوشمند مبتنی بر داده های واقعی در توسعه چرخه های رانندگی بومی، بهبود بهره وری انرژی و پشتیبانی از راهبردهای حمل‌ونقل پایدار در محیط‌های شهری است.

کلمات کلیدی:

چرخه رانندگی، مصرف سوخت، بهینه سازی، رفتار رانندگی، سمنان

*نویسنده عهده دار مکاتبات: Kharazmi@semnan.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

افزایش مصرف سوخت، تشدید آلاینده‌های زیست محیطی و وابستگی روزافزون به منابع فسیلی، از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی صنعت حمل‌ونقل در دهه‌های اخیر به شمار می‌روند[۱]. بخش حمل‌ونقل جاده‌ای سهم قابل‌توجهی از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده و در این میان، خودروهای سواری بنزینی به‌دلیل تعداد بالا و الگوهای متنوع رانندگی، نقش پررنگی در مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها ایفا می‌کنند[۲-۴]. ازاین‌رو، بهبود بهره‌وری انرژی خودروها نه‌تنها از منظر فنی، بلکه از دیدگاه سیاست‌گذاری انرژی و حفاظت از محیط‌زیست، به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل شده است[۵]. یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر مصرف سوخت خودرو، الگوی رانندگی و شرایط واقعی تردد در محیط‌های شهری است. اگرچه آزمون‌های استانداردی نظیر چرخه جهانی هماهنگ تست خودروهای سبک [۱]و چرخه رانندگی جدید اروپایی[۲] برای ارزیابی مصرف سوخت و آلایندگی خودروها توسعه یافته‌اند، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این چرخه‌های استاندارد همواره قادر به بازنمایی دقیق رفتار واقعی رانندگی در شهرهای مختلف نیستند[۶-۸]. تفاوت در ساختار معابر، تراکم ترافیک، سبک رانندگی رانندگان، شرایط اقلیمی و توپوگرافی شهری موجب می‌شود که مصرف سوخت واقعی خودروها به‌طور معناداری با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در چرخه های استاندارد اختلاف داشته باشد. این شکاف میان شرایط آزمایشگاهی و دنیای واقعی، نیاز به توسعه چرخه‌های رانندگی بومی و مبتنی بر داده‌های واقعی را بیش از پیش برجسته می‌سازد[۹،۱۰]. در سال‌های اخیر، با گسترش سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی ، تلفن‌های هوشمند و ابزارهای ثبت داده، امکان جمع‌آوری حجم بالایی از اطلاعات رانندگی واقعی فراهم شده است. این داده‌ها فرصت ارزشمندی را برای استخراج چرخه‌های رانندگی واقع‌گرایانه، تحلیل رفتار راننده و شناسایی عوامل مؤثر بر مصرف سوخت فراهم می‌کنند. با این حال، چالش اصلی در این حوزه، پردازش مؤثر داده‌های حجیم، خوشه‌بندی مناسب سفرها، استخراج شاخص‌های دینامیکی رانندگی و در نهایت، استفاده هدفمند از این اطلاعات برای کاهش مصرف سوخت بدون خدشه به واقع‌گرایی چرخه رانندگی است. از سوی دیگر، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند، به‌ویژه الگوریتم‌های فرا ابتکاری، در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزارهایی توانمند برای حل مسائل پیچیده و چندهدفه در مهندسی خودرو مطرح شده‌اند[۱۱،۱۲]. این الگوریتم‌ها امکان بهینه‌سازی همزمان چندین پارامتر متضاد، نظیر مصرف سوخت، نرمی پروفایل سرعت، حفظ زمان سفر و تطابق با محدودیت‌های فیزیکی خودرو را فراهم می‌سازند. با این حال، بسیاری از مطالعات پیشین یا صرفاً به استخراج چرخه رانندگی بسنده کرده‌اند و یا بهینه‌سازی را بدون اتکا به داده‌های واقعی و رفتار حقیقی رانندگان انجام داده‌اند که این امر می‌تواند منجر به چرخه‌هایی غیرواقعی و کم‌کاربرد در شرایط عملی شود. در این راستا، شهر سمنان به‌عنوان یک شهر با ویژگی‌های ترافیکی، جمعیتی و هندسی خاص، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه و تحلیل رفتار رانندگی شهری در مقیاس متوسط محسوب می‌شود. بررسی الگوهای رانندگی واقعی در این شهر می‌تواند دیدگاه مناسبی نسبت به مصرف سوخت خودروهای سواری در شرایط واقعی ایران فراهم کرده و مبنایی برای توسعه چرخه های رانندگی بومی و قابل اتکا ایجاد کند[۱۳-۲۰]. همچنین، مطالعاتی برای استخراج چرخه رانندگی برخی شهرها نظیر تهران، مشهد، کرمانشاه و توسعه مدل هایی برای سمنان انجام شده که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه چرخه رانندگی

Table 1. Overview of Studies Conducted on Driving Cycles

ردیف	نویسندگان	موضوع مطالعه	شهر	سال	مرجع

[1] Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle
[2] New European Driving Cycle

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱	فتوحی و همکاران	استخراج چرخه رانندگی سواری شهر تهران	تهران	۱۳۹۱	[۲۱]
۲	موسویان و همکاران	استخراج چرخه رانندگی محدوده غربی شهر تهران با استفاده از خودروی مجهز به موتور پرخوران با استفاده از روش خوشه بندی ریزسفر	تهران	۱۳۹۸	[۲۲]
۳	وزیری و همکاران	اثر ماژول موقعیت یاب در تلفن همراه بر دادهبرداری از رانندگی مسیر سمنان- شاهرود	سمنان	۱۴۰۲	[۲۳]
۴	ملکان و همکاران	استفاده از الگوریتم میانگین کی برای خوشه بندی دادههای رانندگی به منظور بررسی تاثیر نوع تجهیزات دادهبرداری در مسیر تهران- سمنان	سمنان	۱۴۰۲	[۲۴]
۵	علیاری بروجنی و همکاران	آنالیز ماتریس درهم ریختگی در طبقه بندی چن دبرچسبی برای توسعه چرخه رانندگی در شهر بابل	بابل	۱۴۰۲	[۲۵]
۶	علیاری بروجنی و همکاران	تاثیر حالت رانندگی در خودروی تویوتا پریوس بر تدوین چرخه رانندگی در شهر سمنان	سمنان	۱۴۰۲	[۲۶]
۷	آزادی و همکاران	توسعه یک چرخه رانندگی براساس داده های ضبط شده از یک خودروی هیبرید بنزینی- الکتریکی در دو مسیر از شهر تهران با الگوریتم میانگین کی	تهران	۱۴۰۲	[۲۷]
۸	صادقی و همکاران	خوشه بندی و هموارسازی با استفاده از داده های واقعی جمع آوری شده از اتوبوس شهری برای استخراج چرخه رانندگی در شهر کرمانشاه	کرمانشاه	۱۴۰۳	[۲۸]
۹	شهابی نیا و همکاران	توسعه چرخه رانندگی بومی برای شهر سمنان بر پایه داده های واقعی ناوگان اتوبوسرانی دیزلی شهری در مسیری محدود	سمنان	۱۴۰۴	[۲۹]
۱۰	علیاری بروجنی و همکاران	مقایسه توابع کرنل در استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای دسته بندی داده های رانندگی	سمنان	۱۴۰۴	[۳۰]
۱۱	خرازیان و همکاران	استفاده از چرخه رانندگی واقعی برای تعیین ضرایب انتشار آلاینده‌ها (محدود)	مشهد	۱۴۰۴	[۳۱]
۱۲	خالصی و همکاران	استخراج چرخه رانندگی ناوگان اتوبوسرانی شهر سمنان	سمنان	۱۴۰۵	[۳۲]

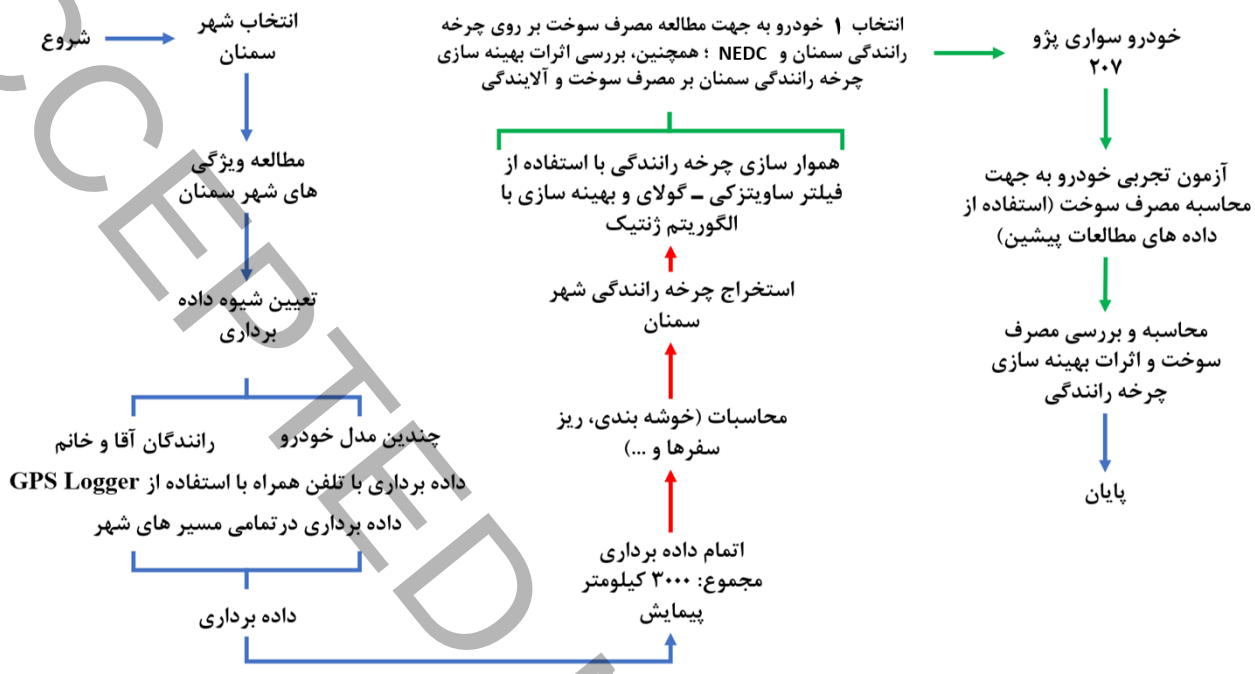
مطالعه حاضر با هدف ارائه یک چارچوب جامع و داده محور برای استخراج و بهینه سازی چرخه رانندگی واقعی شهر سمنان انجام شده است. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که صرفاً بر استخراج چرخه رانندگی یا تحلیل ویژگی‌های آماری آن متمرکز بوده‌اند، در این تحقیق فرآیند استخراج چرخه رانندگی، مدل‌سازی مصرف سوخت و بهینه سازی چرخه به صورت یکپارچه در یک ساختار منسجم تلفیق شده است. نوآوری اصلی پژوهش در بهره‌گیری هم زمان از داده‌های واقعی سامانه موقعیت یاب جهانی[1]، بازآرایی ریزسفرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ارزیابی مصرف سوخت مبتنی بر نتایج آزمون چرخه جدید رانندگی اروپا[2] است؛ به گونه ای که ویژگی های واقعی رانندگی به مانند زمان سفر و الگوی حرکتی غالب حفظ شده و امکان کاهش مصرف سوخت نیز فراهم شده است. از سوی دیگر، برخلاف روش‌های متداول که منجر به تولید چرخه‌های بهینه اما غیرواقعی می‌شوند، رویکرد پیشنهادی با حفظ واقع‌گرایی رفتار رانندگی، قابلیت کاربرد در شرایط عملی را داراست. بنابراین، دستاورد این پژوهش تنها ارائه یک چرخه رانندگی بومی برای شهر سمنان نیست، بلکه معرفی یک روش قابل تعمیم برای توسعه و بهینه‌سازی چرخه های رانندگی در سایر شهرها با هدف بهبود بهره وری انرژی و کاهش مصرف سوخت در شرایط واقعی تردد است.

[1] Global Positioning System (GPS)
[2] New European Driving Cycle (NEDC)

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲- روش پژوهش

مطالعه حاضر شهر سمنان را به منظور استخراج و بهینه سازی چرخه رانندگی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به جهت کاهش و بررسی اثرات بهینه سازی بر مصرف سوخت در نظر گرفته است. نمای کلی از روش پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای کلی روش پژوهش

Figure 1. Overview of the Research Methodology

شهر سمنان که نقشه آن و مسیر داده برداری مطالعه حاضر در شکل ۲ نشان داده شده مرکز استان سمنان بوده و در نواحی مرکزی کشور واقع شده است. سمنان بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ۱۹۶۵۲۱ نفر بوده است. سمنان از شمال با شهرستان مهدیشهر و از شرق با شهرستان دامغان و از غرب با شهرستان سرخه و از جنوب با کویر و استان اصفهان همسایه است. شهر سمنان در ارتفاع ۱۱۳۸ متری از سطح دریا قرار دارد.

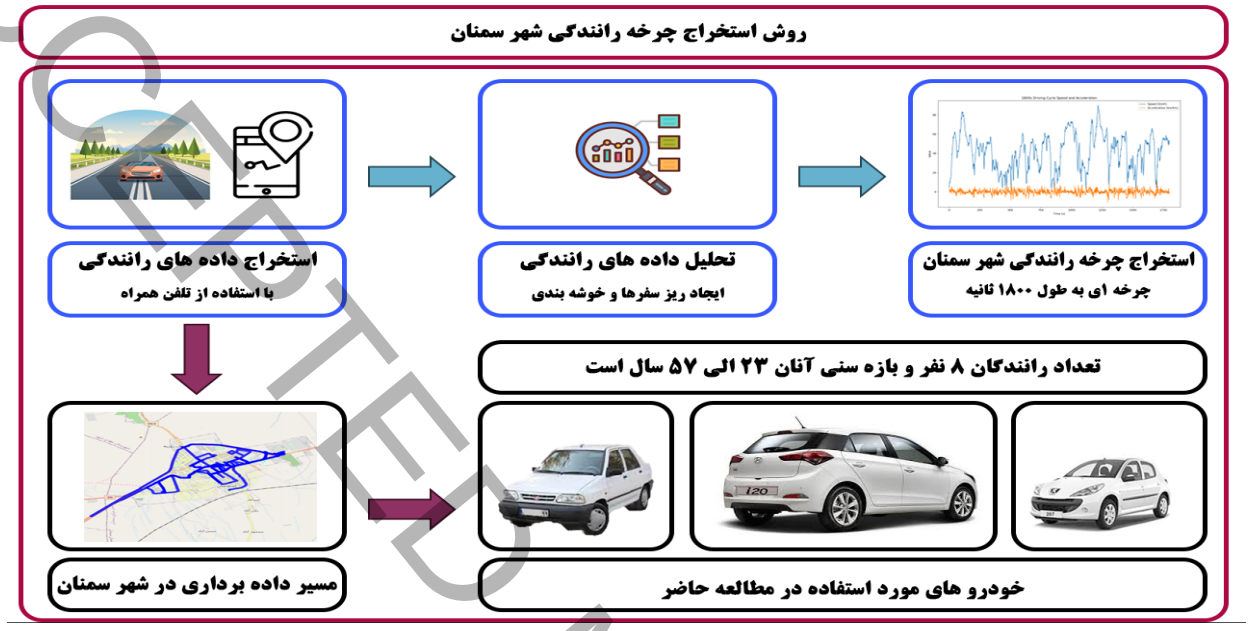


شکل ۲. نقشه شهر سمنان و مسیر داده برداری مطالعه حاضر

Figure 2. Map of Semnan City and the Data Collection Route of the Present Study

ACCEPTED MANUSCRIPT

در شکل ۳ تصویری از مراحل استخراج چرخه رانندگی و مسیر داده برداری نشان داده شده است. شایان ذکر است که در مجموع به مسافت ۳۰۰۰ کیلومتر عمل داده برداری در مدت زمان ۴ ماه صورت گرفته است تا با در نظر گرفتن کمیت تکرار پذیری بتوان چرخه رانندگی دقیقی را بدست آورد.



شکل ۳. روش استخراج چرخه رانندگی

Figure 3. Driving Cycle Extraction Method

در این پژوهش، به منظور انجام فرایند داده برداری از نرم افزار تلفن همراه به نام جی پی اس لاگر[1] به عنوان سکویی برای ثبت طول و عرض جغرافیایی، تعداد ماهواره های در دسترس، ارتفاع از سطح دریا، سرعت و زمان استفاده شده که اطلاعات تلفن های همراه مورد استفاده در فرآیند داده برداری در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. اطلاعات تلفن های همراه مورد استفاده در داده برداری

Table 2. Specifications of the Mobile Phones Used for Data Collection

ردیف	نام	هسته پردازنده	سازنده	ردیف	نام	هسته پردازنده	سازنده
۱	آ ۱۲	۸ هسته	سامسونگ	۵	آ ۵۰	۸ هسته	سامسونگ
۲	آ ۱۴	۸ هسته	سامسونگ	۶	آ ۳۵	۸ هسته	سامسونگ
۳	آیفون ۱۳	۶ هسته	اپل	۷	ردمی نوت ۱۲	۸ هسته	شیائومی
۴	پوکو ایکس ۳	۸ هسته	شیائومی	۸	آیفون ۱۵	۶ هسته	اپل

فایل داده را در این نرم افزار می توان در یکی از فرمت های GPX، KML و TXT ذخیره کرد. پس از اتمام فرایند داده برداری به منظور مقایسه و دسته بندی سفرهای انجام شده باید مشخصه های برای هر یک از سفرها تعریف کرد. در ادامه مشخصه‌های مد نظر بیان خواهد شد که در آن‌ها واحدهای اندازه گیری زمان، سرعت و شتاب به ترتیب برابر ثانیه، کیلومتر بر ساعت و متر بر مجذور ثانیه

[1] GPS Logger

ACCEPTED MANUSCRIPT

است.برای هر سفر می‌توان مسافت کلی طی شده و مدت زمان کل داده برداری را به ترتیب با استفاده از معادلات (۱) و (۲) به‌دست آورد:

$$dist = (t_2 - t_1)\frac{V_1}{3.6} + \sum_{i=2}^{n}(t_i - t_{i-1})\frac{V_i}{3.6} \quad (۱)$$

$$T_{\text{total}} = t_2 - t_1 + \sum_{i=2}^{n}(t_i - t_{i-1}) \quad (۲)$$

با استفاده از معادله (۳) می‌توان مجموع زمان هایی که خودرو در طول مسیر متوقف بوده است را به دست آورد، که به آن زمان توقف گفته می‌شود.

$$T_{stop} = \begin{cases} t_2 - t_1 (V_1 = 0 \cap a_1 = 0) \\ 0 \quad (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n} \begin{cases} t_i - t_{i-1} (V_i = 0 \cap a_i = 0) \\ 0 \quad (else) \end{cases} \quad (۳)$$

حال با داشتن مجموع زمان توقف و زمان کل داده برداری می‌توان زمان رانندگی بدون توقف را به صورت معادله ۴ به‌دست آورد.

$$T_{drive} = T_{total} - T_{stop} \quad (۴)$$

در هنگام رانندگی به طور کلی سه حالت ممکن است پیش بیاید که عبارت‌اند از: شتاب‌دهی، شتاب‌کاهی و بدون شتاب (کروز). بنابراین می‌توان زمان رانندگی به دست آمده را به دسته‌های کوچک‌تری تقسیم کرد. برای به‌دست آوردن مشخه زمانی حالت‌های مختلف رانندگی که عبارت‌اند از: زمان شتاب‌دهی، زمان شتاب کاهی و زمان کروز به ترتیب از معادلات (۵)، (۶) و (۷) استفاده خواهد شد. برای تعیین این سه مشخصه از متغیر ثابتی به نام آستانه شتاب استفاده می‌شود که در معادلات مذکور با نام acc_threshold آمده است.

$$T_{acc} = \begin{cases} t_2 - t_1 (a_1 > acc_threshold) \\ 0 \quad (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n} \begin{cases} t_i - t_{i-1} (a_i > -acc_threshold) \\ 0 \quad (else) \end{cases} \quad (۵)$$

$$T_{dec} = \begin{cases} t_2 - t_1 (a_1 < acc_threshold) \\ 0 \quad (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n} \begin{cases} t_i - t_{i-1} (a_i < -acc_threshold) \\ 0 \quad (else) \end{cases} \quad (۶)$$

$$T_{cruise} = T_{drive} - T_{acc} - T_{dec} \quad (۷)$$

برای بیان نسبی هر یک از فعالیت های رانندگی باید مدت زمان آن‌ها را بر زمان کل داده برداری تقسیم کرد، برای این کار می‌توان به صورت معادلات (۸) الی (۱۲) عمل کرد:

$$\%drive = \frac{T_{drive}}{T_{total}} \quad (۸)$$

$$\%cruise = \frac{T_{cruise}}{T_{total}} \quad (۹)$$

$$\%acc = \frac{T_{acc}}{T_{total}} \quad (۱۰)$$

$$\%dec = \frac{T_{dec}}{T_{total}} \quad (۱۱)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\%stop = \frac{T_{stop}}{T_{total}} \quad (۱۲)$$

در ادامه به جهت محاسبه میانگین سرعت به صورت معادله (۱۳) مسافت کل بر زمان کل تقسیم می‌شود. همچنین، به منظور محاسبه مشخصه میانگین سرعت رانندگی باید مسافت کل را بر زمان رانندگی تقسیم کرد، که در معادله (۱۴) نشان داده شده است.

$$\bar{v}_{trip} = 3.6\frac{dist}{T_{total}} \quad (۱۳)$$

$$\bar{v}_{drive} = 3.6\frac{dist}{T_{drive}} \quad (۱۴)$$

در حوزه شتاب نیز برای محاسبه میانگین شتاب مثبت و میانگین شتاب منفی به‌ترتیب همانند معادله های (۱۵) و (۱۶) عمل می‌شود.

$$a_{pos_{av}} = \bar{a}_{pos} = \left(\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases}\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}a_i & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases} \quad (۱۵)$$

$$a_{neg_{av}} = \bar{a}_{neg} = \left(\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases}\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}a_i & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases} \quad (۱۶)$$

در انتها برای محاسبه مشخصه‌های تعداد کل شتاب‌ها، تعداد کل توقف‌ها و میانگین زمان توقف‌ها به‌ترتیب همانند معادله‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) عمل شده است.

$$acc_nr = \sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > acc_threshold \cap a_{i-1} \leq acc_threshold)\\ 0 & (else)\end{cases} \quad (۱۷)$$

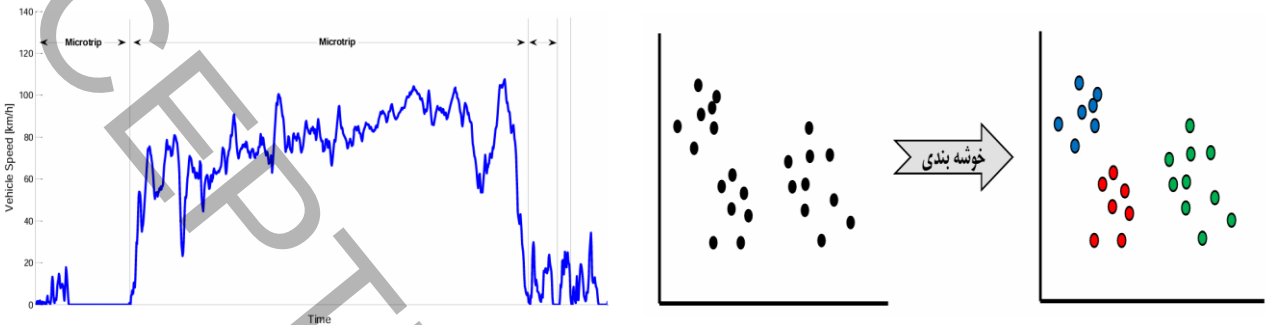
$$stop_nr = \sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (\{v_i = 0 \cap a_i = 0\} \cap \{v_{i-1} \neq 0 \cup a_{i-1} \neq 0\})\\ 0 & (else)\end{cases} \quad (۱۸)$$

$$stop_{T_{av}} = \bar{T}_{stop} = \frac{T_{stop}}{stop_{nr}} \quad (۱۹)$$

که زمان، سرعت و شتاب به صورت آرایه ای از اعداد با n ردیف در نظر گرفته شده است. معادلات درج شده در این بخش، علاوه بر استخراج شاخص های آماری رانندگی، دارای تفسیر فیزیکی مشخصی نیز هستند. زمان توقف بیانگر مدت زمانی است که خودرو بدون جابه‌جایی در جریان ترافیک قرار دارد و افزایش آن معمولاً با افزایش مصرف سوخت و کاهش بازده انرژی همراه است. همچنین، زمان‌های شتاب‌گیری و کاهش سرعت بیان‌کننده میزان تغییرات دینامیکی حرکت خودرو هستند. از دیدگاه فیزیکی، فازهای شتاب‌گیری به دلیل نیاز به غلبه بر اینرسی خودرو و تأمین انرژی جنبشی بیشتر، از پرمصرف‌ترین بخش‌های رانندگی محسوب می شوند. در مقابل، افزایش تعداد ترمزگیری‌ها نشان‌دهنده اتلاف مکرر انرژی جنبشی خودرو است. سرعت متوسط و سرعت متوسط رانندگی نیز وضعیت عملکرد خودرو در شبکه ترافیکی را توصیف کرده و تعیین‌کننده محدوده کاری موتور و میزان مصرف سوخت هستند. علاوه بر این، میانگین شتاب‌های مثبت و منفی به‌عنوان شاخصی از شدت تغییرات سرعت، بیانگر میزان تهاجمی یا یکنواخت بودن سبک رانندگی بوده و ارتباط مستقیمی با مصرف انرژی خودرو دارند. بنابراین، مجموعه این شاخص‌ها قادر است رفتار فیزیکی خودرو در شرایط واقعی رانندگی را توصیف کرده و مبنای مناسبی برای استخراج و بهینه‌سازی چرخه رانندگی فراهم آورد. همچنین

ACCEPTED MANUSCRIPT

لازم به ذکر است برای تعیین تعداد بهینه خوشه ها در الگوریتم های خوشه بندی، از روش آرنج [1] استفاده شده که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. قابل توجه است که خوشه بندی یکی از ابزارهای پرکاربرد در حوزه یادگیری ماشین و داده کاوی به شمار می رود که برای استخراج اطلاعات مفید و الگوهای نهفته در داده ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های مختلفی برای استخراج دانش از داده‌ها وجود دارد که در میان آن‌ها، خوشه بندی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش ها است که به طور ترسیمی در شکل ۴ـالف و همچنین شایان ذکر است که به منظور ایجاد ریز سفر فاصله میان دو سرعت صفر کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است که نمونه ای از آن در شکل ۴ـ ب نشان داده شده است.

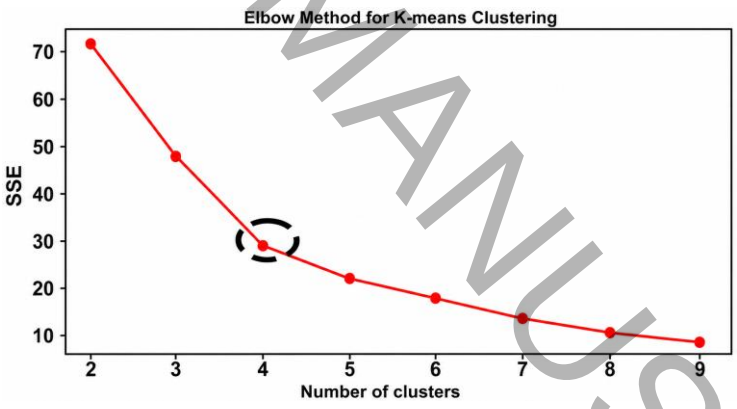


الف) مفهوم خوشه بندی به طور ترسیمی ب) شیوه تعریف ریزسفر

شکل ۴. مفهوم خوشه بندی و ریزسفر به طور ترسیمی[۲۲]

Figure 4. Schematic Illustration of the Concepts of Clustering and Micro-trips[۲۲]

هدف خوشه بندی میانگین کی [2] خوشه بندی داده ها به k خوشه است به نحوی که مقدار مجموع مربعات میان مرکز و داده ها در هر خوشه کمینه شود. به بیان ساده تر هدف این روش کمینه کردن فاصله بین مراکز خوشه ها با داده های آن خوشه است [۲۲].



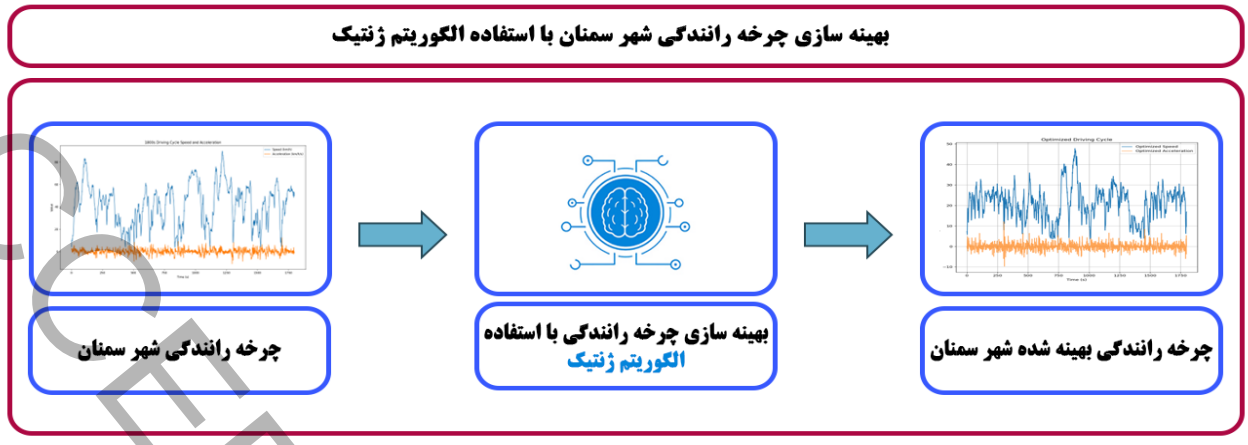
شکل ۵. روش آرنج به جهت تعیین تعداد خوشه های بهینه

Figure 5. The Elbow Method for Determining the Optimal Number of Clusters

مطابق با شکل ۵ تعداد ۴ خوشه بهینه است. که بر این اساس خوشه بندی اعمال شده است. همچنین پس از استخراج چرخه رانندگی شهر سمنان به جهت بهینه سازی چرخه رانندگی در راستای کاهش مصرف سوخت مطابق با مسیر نشان داده شده در شکل ۶ عمل شده است.

[1] Elbow Method
[2] K-means Clustering

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶. مسیر بهینه سازی چرخه رانندگی شهر سمنان به جهت کاهش مصرف سوخت

Figure 6. Optimization Process of the Semnan City Driving Cycle to Reduce Fuel Consumption

مطابق با شکل ۳ و ۶ چارچوب داده محور به منظور بهینه سازی مصرف سوخت در چرخه رانندگی واقعی خودروهای سواری ارائه شده است. چرخه رانندگی واقعی شهر سمنان، استخراج شده از داده‌های میدانی مبتنی بر سامانه موقعیت‌یاب جهانی، به عنوان مبنای تحلیل و بهینه‌سازی انتخاب شد. پروفایل سرعت زمان این چرخه پس از پیش‌پردازش اولیه، برای محاسبه شتاب لحظه‌ای و تحلیل ویژگی‌های رانندگی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور استخراج و صحه‌گذاری مدل مصرف سوخت، آزمون چرخه رانندگی استاندارد چرخه رانندگی جدید اروپا بر روی خودروی سواری پژو ۲۰۷ اتوماتیک که مشخصات آن در جدول ۳ درج شده است و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی با استفاده از دینامومتر شاسی انجام شده است. نتایج حاصل و شرایط این آزمون که برگرفته از تحقیقات پیشین شهابی نیا و همکاران است، در جدول ۴ ارائه شده است[۴]. داده‌های حاصل از آزمون پس از پردازش، برای استخراج رابطه بین مصرف سوخت، سرعت و شتاب خودرو مورد استفاده قرار گرفت و یک مدل داده محور مصرف سوخت ایجاد شد. در ادامه، مدل استخراج شده بر روی چرخه رانندگی واقعی شهر سمنان اعمال و مصرف سوخت مرجع چرخه پیش از بهینه سازی محاسبه گردید. سپس مسئله بهینه سازی با هدف کمینه سازی مصرف کل سوخت تعریف شد. در این فرآیند، قیود فیزیکی و رفتاری رانندگی واقعی از جمله ثابت بودن مدت زمان، محدودیت‌های شتاب و ویژگی‌های توقف در نظر گرفته شد تا رفتار کلی رانندگی حفظ شود. شایان ذکر است هدف از بازآرایی ریزسفرها تولید یک چرخه رانندگی نماینده برای ارزیابی مصرف سوخت و تحلیل رفتار دینامیکی خودرو است و نه بازسازی یک مسیر جغرافیایی مشخص در شبکه معابر شهر؛ هر ریزسفر به عنوان بخشی از رانندگی بین دو توقف متوالی تعریف شده و دارای نقطه آغاز و پایان با سرعت صفر است. ازاین‌رو، بازآرایی ریزسفرها در الگوریتم ژنتیک بر مبنای حفظ ویژگی های آماری و دینامیکی چرخه انجام شده است. به دلیل آن‌که چرخه رانندگی نماینده لزوماً معادل یک مسیر واقعی در شبکه معابر نیست، قید پیوستگی جغرافیایی بین ریزسفرهای متوالی در تابع هدف لحاظ نشده است. با این حال، آغاز و پایان هر ریز سفر در حالت توقف کامل و همچنین اعمال فرآیند هموارسازی پس از بهینه سازی، موجب حفظ پیوستگی دینامیکی پروفایل سرعت - زمان و جلوگیری از ایجاد تغییرات غیرواقعی در چرخه نهایی شده است.فرآیند بهینه سازی به روش اصلاح تکرارشونده پروفایل سرعت زمان چرخه رانندگی و ارزیابی مصرف سوخت متناظر با هر تکرار انجام گرفت است. لازم به ذکر است کلیه مراحل پردازش داده‌ها، مدل‌سازی مصرف سوخت و اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون پیاده‌سازی شده است.

جدول ۳. مشخصات خودرو پژو ۲۰۷ اتوماتیک [۴]

Table 3. Specifications of the Peugeot 207 Automatic Vehicle[۴]

مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
نوع موتور	TU5	-	سیستم انژکتوری	چند نقطه ای	-
حجم موتور	۱۵۸۷	سی سی	وزن خودرو	۱۰۸۷	کیلوگرم
توان در ۵۸۰۰ دور بر دقیقه	۱۰۵	اسب بخار	طول خودرو	۳۸۷۲	میلی متر

ACCEPTED MANUSCRIPT

گشتاور در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه	۱۴۲	نیوتون متر	عرض خودرو	۱۶۶۹	میلی متر
تعداد سوپاپ	۱۶	-	ارتفاع خودرو	۱۴۴۱	میلی متر
نوع سوخت	بنزین	-	مخزن سوخت	۵۰	لیتر

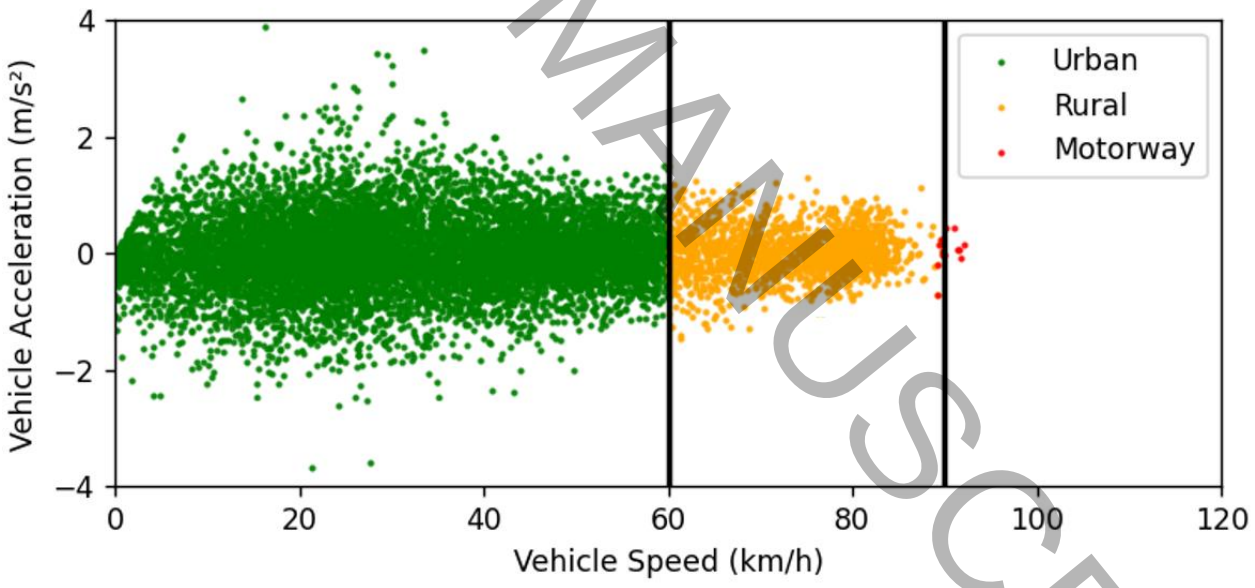
جدول ۴. نتایج و شرایط آزمون خودرو پژو ۲۰۷ اتوماتیک در چرخه رانندگی جدید اروپا [۴]

Table 4. Test Results and Conditions of the Peugeot 207 Automatic Vehicle Under the NEDC Driving Cycle[۴]

مشخصه	مقدار	واحد	کل مصرف / انتشار	واحد
مصرف سوخت در ۱۰۰ کیلومتر	۷/۲۱	لیتر	۰/۸۹۷	لیتر
کربن مونوکسید	۰/۳۸۸	گرم بر کیلومتر	۵/۳۴	گرم
کربن دی اکسید	۱۶۸/۹۸۳	گرم بر کیلومتر	۲۳۴۲/۷	گرم
اکسید های نیتروژن	۰/۰۰۶	گرم بر کیلومتر	۰/۰۸۴	گرم
هیدروکربن	۰/۰۸۴	گرم بر کیلومتر	۱/۰۹۵	گرم
دمای محیط آزمون	۲۸	سانتی گراد	-	-
فشار محیط آزمون	۹۰	کیلوپاسکال	-	-
مسافت معادل	۱۲/۵۰	کیلومتر	-	-

۳-بحث و نتایج

در شکل ۷، چگالی سرعت و شتاب در هر خوشه استخراج شده از داده های یک پیماش شهری به طول ۲ ساعت در در شهر سمنان نمایش داده شده است.



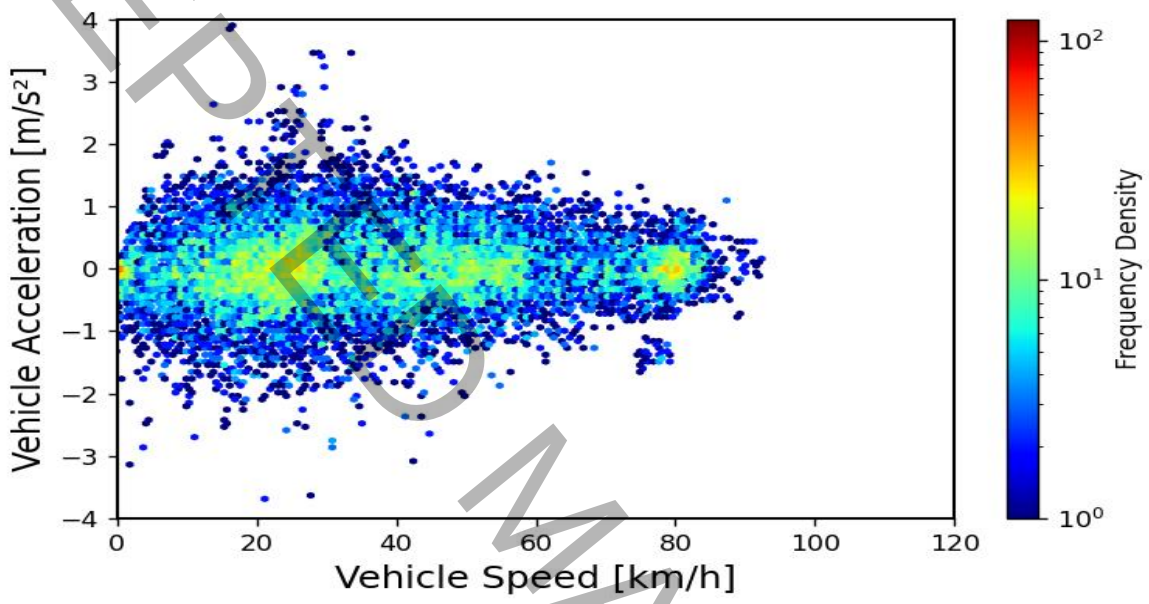
شکل ۷. چگالی سرعت و شتاب در هر خوشه استخراج شده از داده های یک پیماش شهری به طول ۲ ساعت

Figure 7. Speed and Acceleration Density in Each Cluster Extracted from the Data Collected During a 2-Hour Urban Driving Survey

مطابق شکل ۷، توزیع چگالی داده‌های یک پمایش شهری به طول ۲ ساعت در شهر سمنان نشان می‌دهد که بخش عمده سفره در خوشه هایی با سرعت متوسط پایین تا میانی و درصد زمان توقف قابل‌توجه قرار دارند. تعداد بالای توقف ها و سهم زیاد زمان توقف بیانگر غالب بودن الگوی توقف حرکت در ترافیک شهری است که به طور مستقیم با افزایش مصرف سوخت، به ویژه در فازهای شتاب‌گیری مجدد، مرتبط می‌باشد. در مقابل،

ACCEPTED MANUSCRIPT

خوشه‌های با سرعت میانگین بالاتر دارای تعداد توقف کمتر بوده و شرایط رانندگی یکنواخت‌تری را نشان می‌دهند. شکل ۷ توزیع چگالی شتاب بر حسب سرعت را در تمام ۳۰۰۰ کیلومتر پیمایش انجام شده را نمایش می‌دهد که تمرکز اصلی آن در ناحیه شتاب های نزدیک به صفر و سرعت‌های پایین تا متوسط قرار دارد. با این حال، وجود پراکندگی قابل ملاحظه در نواحی شتاب‌های مثبت و منفی بزرگ نشان‌دهنده وقوع مکرر شتاب‌گیری و ترمزگیری‌های شدید در سرعت‌های پایین است. این رفتار دینامیکی ناپایدار، به‌ویژه در محدوده‌های کم بازده عملکرد موتور، نقش مهمی در افزایش مصرف سوخت ایفا می‌کند. ترکیب نتایج شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که خوشه های دارای زمان توقف بالا، همزمان با افزایش دامنه و فراوانی شتاب‌های شدید همراه هستند. ازاین‌رو، کاهش مصرف سوخت در چرخه رانندگی واقعی بیش از آنکه به افزایش سرعت متوسط وابسته باشد، به کاهش نوسانات شتاب و کاهش توقف‌های غیرضروری وابسته است. این یافته‌ها مبنای فنی مناسبی برای اعمال فرآیند بهینه‌سازی چرخه رانندگی و بازآرایی ریز سفر ها با هدف هموارسازی پروفایل سرعت و شتاب فراهم می‌کند.

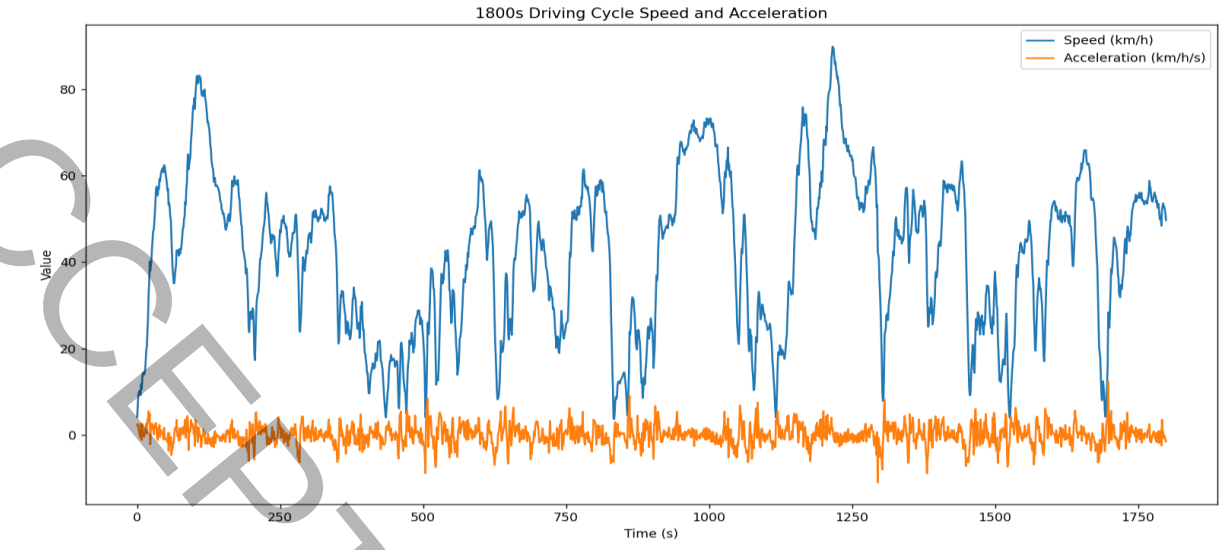


شکل ۸. نمودار چگالی شتاب بر حسب سرعت

Figure 8. Acceleration Density as a Function of Speed

شکل ۹ چرخه رانندگی استخراج شده از داده‌های واقعی رانندگی شهر سمنان را نشان می‌دهد که به‌صورت پروفایل سرعت زمان ارائه شده است. این چرخه با حفظ ویژگی‌های آماری اصلی داده‌ها، از جمله سرعت متوسط، توزیع شتاب و نسبت زمان توقف، رفتار غالب توقف حرکت و نوسانات سرعت در شرایط ترافیک شهری را به‌خوبی بازنمایی می‌کند. وجود فازهای متعدد شتاب‌گیری و کاهش سرعت، در کنار بازه‌های توقف، بیانگر واقع‌گرایی چرخه استخراج شده و قابلیت آن برای استفاده به‌عنوان مبنای تحلیل مصرف سوخت و فرآیند بهینه‌سازی در مراحل بعدی پژوهش است.

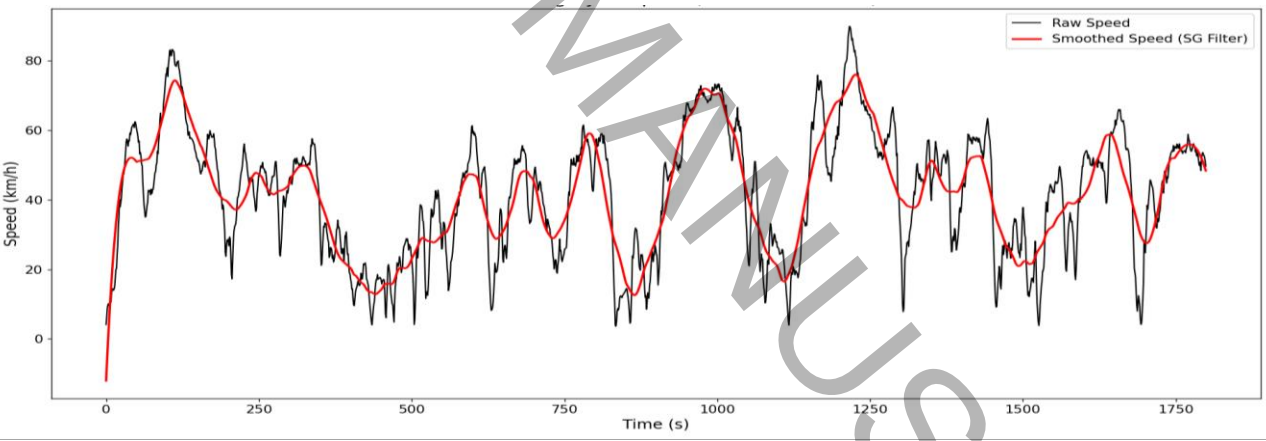
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۹. چرخه رانندگی مستخرج از مطالعه حاضر برای شهر سمنان

Figure 9. Driving Cycle Developed in the Present Study for Semnan City

شکل ۱۰ چرخه رانندگی شهر سمنان پس از اعمال فرآیند هموارسازی با استفاده از فیلتر ساوی‌تزکی-گولِی[1] را نشان می‌دهد. این فرآیند با کاهش نوسانات ناگهانی سرعت و شتاب، ضمن حفظ ساختار کلی چرخه و ویژگی‌های آماری آن، پروفایل نرم‌تر و فیزیکی‌تری ایجاد کرده است. هموارسازی انجام‌شده به‌ویژه موجب کاهش شتاب‌های لحظه‌ای غیرواقعی شده و چرخه حاصل را برای استفاده در فرآیندهای مدل‌سازی مصرف سوخت و بهینه‌سازی بعدی مناسب‌تر می‌سازد.



شکل ۱۰. هموار سازی چرخه رانندگی شهر سمنان با فیلتر Savitzky-Golay

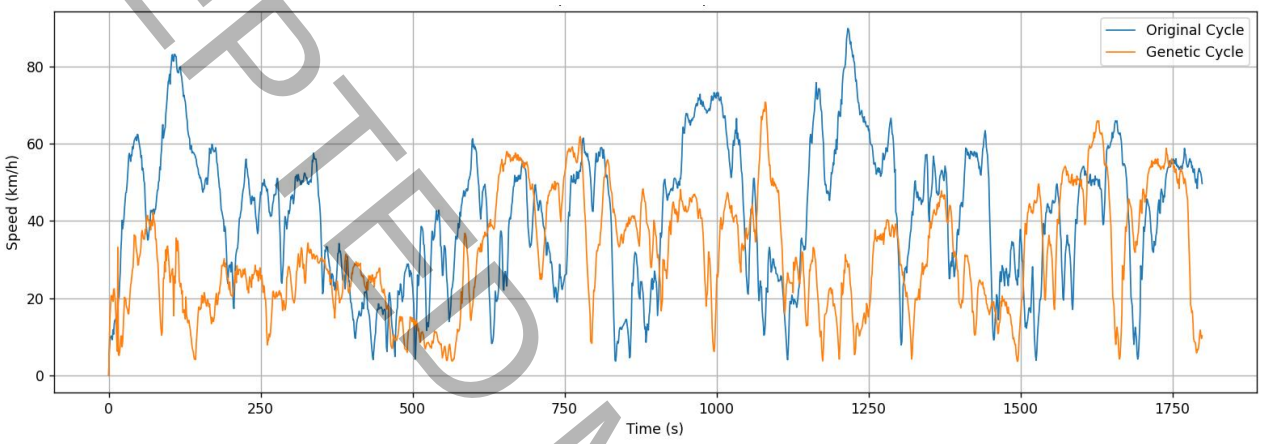
Figure 10. Smoothing of the Semnan City Driving Cycle Using the Savitzky–Golay Filter

سپس به جهت بهینه سازی چرخه رانندگی شهر سمنان در راستای کاهش مصرف سوخت تابع هدف در بهینه سازی، علاوه بر محاسبه مصرف واقعی سوخت خودرو (۷٫۲۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر)، شامل مجازات هایی برای شتاب ها و ترمز های شدید نیز بود تا رفتار واقعی خودرو در شرایط رانندگی شبیه سازی شود. به این ترتیب، الگوریتم ژنتیک قادر شد ترتیب ریز سفرها را به گونه‌ای تنظیم کند که چرخه نهایی دارای پروفایل های سرعت و شتاب نرم‌تر و یکنواخت تر باشد. لازم به ذکر است الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه سازی تکاملی، در جهت یافتن چرخه رانندگی بهینه شهری مورد استفاده قرار گرفته است. با اعمال عملگرهای ژنتیکی بر روی جمعیت اولیه از ریز سفر های رانندگی، ترکیبات متنوعی

[1] Savitzky–Golay

ACCEPTED MANUSCRIPT

از الگوهای حرکتی ایجاد و ارزیابی شده‌اند. فرآیند انتخاب، جهش و ترکیب، منجر به تولید نسل‌های جدیدی از چرخه‌های رانندگی شده است که در آن، ریز سفر های بهینه با هدف کاهش مصرف سوخت و بهبود کارایی گزینش و ترکیب شده‌اند. این رویکرد بهینه‌سازی امکان دستیابی به چرخه رانندگی شهری بهینه ای را فراهم آورد. نتیجه این بهینه سازی، کاهش قابل توجه مصرف سوخت کل در مقایسه با چرخه غیر بهینه بوده است که در جدول ۵ و شکل ۱۳ قابل مشاهده است. علاوه بر آن، تحلیل فازهای حرکت نشان داد که چرخه بهینه تعداد رخداد های شتاب و ترمز شدید را کاهش داده و در عین حال زمان کل سفر حفظ شده است. بنابراین، بهینه سازی انجام شده نه تنها مصرف سوخت را کاهش داده، بلکه پویایی حرکت خودرو را نیز بهبود بخشیده و چرخه رانندگی نماینده ای از شرایط واقعی و بهینه ایجاد کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم های هوشمند برای بازآرایی ریز سفرها می‌تواند به صورت مؤثری به صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش تنش‌های ناشی از شتاب های ناگهانی منجر شود. در شکل ۱۱ چرخه اصلی شهر سمنان و چرخه بهینه سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۱. چرخه رانندگی اولیه و چرخه رانندگی بهینه سازی شده مطالعه حاضر

Figure 11. Initial and Optimized Driving Cycles of the Present Study

مطابق نتایج شکل ۱۱، اعمال فرآیند بهینه سازی منجر به کاهش محسوس نوسانات سرعت و شتاب در چرخه رانندگی شده است، در حالی که ساختار کلی چرخه از جمله زمان کل سفر حفظ شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که بهینه‌سازی انجام‌شده عمدتاً بر بازآرایی ریز سفرها و کاهش رفتارهای دینامیکی پرنوسان متمرکز بوده و بدون ایجاد اعوجاج در واقع‌گرایی چرخه رانندگی، شرایط مساعدتری از منظر مصرف سوخت فراهم کرده است چرا که این بهبود در رفتار دینامیکی چرخه، تأثیر مستقیم خود را در کاهش مصرف سوخت نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر ارائه‌شده در جدول ۵ کاهش مصرف سوخت چرخه بهینه‌شده را نسبت به چرخه اولیه تأیید می‌کنند. بدین ترتیب، نتایج عددی جدول ۵ بیانگر کارایی رویکرد پیشنهادی در بهبود بازده انرژی بدون تغییر شرایط کلی رانندگی هستند.

جدول ۵. مشخصات کلیدی و مصرف سوخت در چرخه اولیه و چرخه بهینه

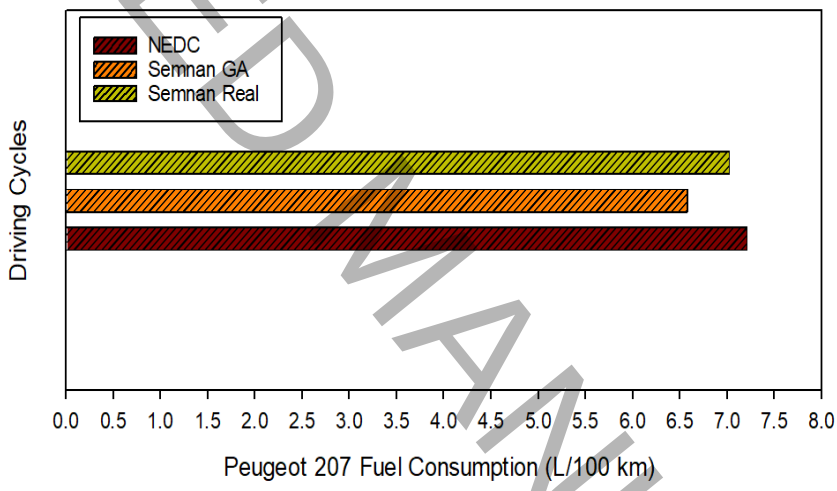
Table 5. Key Characteristics and Fuel Consumption of the Initial and Optimized Driving Cycles

ردیف	چرخه اصلی			چرخه بهینه الگوریتم ژنتیک			درصد اختلاف
	مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد	
۱	زمان	۱۸۰۰	s	زمان	۱۸۰۰	s	۰
۲	مسافت	۲۰/۹۰	km	مسافت	۱۸/۶۰	km	۱۱/۰۰
۳	بیشینه سرعت	۸۷/۶۰	Km/h	بیشینه سرعت	۷۰/۷۰	Km/h	۱۹/۲۹

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴	میانگین سرعت	Km/h	۴۱/۸۰	میانگین سرعت	Km/h	۳۱/۰۰	۲۵/۸۴
۵	کمینه سرعت	Km/h	۰	کمینه سرعت	Km/h	۰	۰
۶	میانگین شتاب مثبت	m/s^2	۱/۸۰	میانگین شتاب مثبت	m/s^2	۱/۶۰	۱۱/۱۱
۷	میانگین شتاب منفی	m/s^2	-۱/۷۰	میانگین شتاب منفی	m/s^2	-۱/۵۰	۱۱/۷۶
۸	مصرف سوخت	L/100km	۷/۰۲	مصرف سوخت	L/100km	۶/۵۸	۶/۲۷

نتایج عددی ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که پس از بهینه سازی چرخه رانندگی، مصرف سوخت از ۷/۰۲ به ۶/۵۸ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر کاهش یافته است. این تغییر با هموارسازی پروفایل سرعت و کاهش شدت شتاب‌گیری و ترمزگیری در چرخه بهینه شده همراه است. با توجه به ثابت بودن مدت‌زمان هر دو چرخه، تغییر مسافت طی شده و سرعت متوسط، بیانگر تغییر الگوی حرکتی حاصل از فرایند بهینه سازی است. بنابراین، کاهش مشاهده شده به عنوان بهبود مصرف سوخت در چرخه بهینه شده تفسیر می‌شود و لزوماً به معنای کاهش مصرف سوخت در سفرهایی با مسافت یکسان نیست. شکل ۱۲ تغییرات مصرف ویژه سوخت خودروی پژو ۲۰۷ را بر حسب لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر در دو چرخه اولیه و بهینه‌شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. مصرف سوخت خودرو پژو ۲۰۷ به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر

Figure 12. Fuel Consumption of the Peugeot 207 per 100 km

نتایج ارائه شده در این بخش نشان داد که چرخه رانندگی استخراج شده از داده‌های واقعی شهر سمنان دارای سهم بالایی از فازهای توقف حرکت و نوسانات شتابی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مصرف سوخت ایفا می‌کنند. تحلیل توزیع سرعت، شتاب و زمان توقف بیانگر آن است که رفتار دینامیکی ناپایدار، به‌ویژه شتاب‌گیری‌ها و ترمزگیری‌های شدید در سرعت‌های پایین، از عوامل اصلی ناکارآمدی انرژی در شرایط رانندگی شهری محسوب می‌شود. اعمال فرآیند بهینه سازی مبتنی بر بازآرایی ریز سفرها، ضمن حفظ مشخصه های آماری کلیدی چرخه از جمله زمان کل سفر و الگوی کلی سرعت، منجر به کاهش دامنه و فراوانی شتاب‌های شدید و هموارسازی پروفایل سرعت شد. این تغییرات دینامیکی مستقیماً در نتایج عددی مصرف سوخت منعکس شده و کاهش مصرف سوخت چرخه بهینه شده نسبت به چرخه اولیه را نشان می‌دهد. قابل توجه است اگرچه نتایج کمی ارائه شده مبتنی بر داده های رانندگی شهر سمنان است، اما چارچوب پیشنهادی دارای قابلیت تعمیم به سایر شهرهای ایران است. دلیل این امر آن است که مراحل اصلی پژوهش شامل جمع‌آوری داده‌های واقعی رانندگی، استخراج چرخه رانندگی، تحلیل شاخص های دینامیکی، مدل‌سازی مصرف سوخت و بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، وابسته به شهر خاصی نبوده و صرفاً به داده‌های واقعی رانندگی هر منطقه نیاز دارند. با این حال، بدیهی است که ویژگی‌های نهایی چرخه رانندگی و میزان کاهش مصرف سوخت در شهرهای مختلف، تحت تأثیر عواملی نظیر تراکم ترافیک، هندسه معابر، شرایط اقلیمی، فرهنگ رانندگی و ترکیب ناوگان حمل‌ونقل قرار خواهد گرفت. بنابراین، چارچوب ارائه شده را می‌توان

ACCEPTED MANUSCRIPT

به عنوان یک روش عمومی برای توسعه چرخه های رانندگی بومی و بهینه در شهرهای مختلف کشور به کار گرفت و از آن برای تحلیل و بهبود عملکرد انرژی خودروها در شرایط واقعی بهره برد. لازم به ذکر است که کاهش مصرف سوخت گزارش شده در این پژوهش بر اساس مدل داده محور مصرف سوخت توسعه‌یافته از نتایج آزمون چرخه رانندگی جدید اروپا محاسبه شده و مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم مصرف سوخت در شرایط واقعی رانندگی نیست. اگرچه این مدل توانایی مناسبی در ارزیابی اثر تغییرات سرعت و شتاب بر مصرف سوخت دارد، اما اثرات ناشی از شیب طولی مسیر، تغییرات ارتفاعی، شرایط محیطی و سایر عوامل مؤثر بر بار خودرو به صورت مستقل در آن لحاظ نشده‌اند. ازاین‌رو، نتایج ارائه شده باید به‌عنوان برآوردی از پتانسیل کاهش مصرف سوخت ناشی از بهبود رفتار دینامیکی چرخه رانندگی تفسیر شوند. همچنین بخشی از بهبود مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از کاهش نوسانات سرعت و شتاب و هموارتر شدن پروفایل رانندگی باشد. در مطالعات آتی، توسعه مدل مصرف سوخت با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی مسیر و انجام اعتبارسنجی میدانی می‌تواند به افزایش دقت نتایج منجر شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک چارچوب داده محور برای استخراج و بهینه سازی چرخه رانندگی واقعی شهر سمنان با هدف کاهش مصرف سوخت خودروهای سواری ارائه شد. چرخه رانندگی بر پایه داده‌های واقعی سامانه موقعیت یابی جهانی جمع‌آوری‌شده از شبکه معابر شهری استخراج و پس از تحلیل ویژگی های دینامیکی آن، فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بازآرایی ریزسفرها انجام شد. نتایج نشان داد که چرخه استخراج‌شده دارای سهم قابل توجهی از فازهای توقف - حرکت، شتاب‌گیری و ترمزگیری‌های مکرر است که از مهم‌ترین عوامل افزایش مصرف سوخت در رانندگی شهری محسوب می‌شوند. اعمال فرآیند بهینه سازی موجب هموارتر شدن پروفایل سرعت - زمان، کاهش شدت تغییرات شتاب و بهبود رفتار دینامیکی چرخه شد. ارزیابی مصرف سوخت بر مبنای مدل توسعه‌یافته از نتایج آزمون چرخه رانندگی جدید اروپا نشان داد که مصرف سوخت از ۷/۰۲ به ۶/۵۸ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر کاهش یافته است که بیانگر بهبود ۶/۲۷ درصدی نسبت به چرخه اولیه است. این نتایج نشان می‌دهد که اصلاح هدفمند ساختار چرخه رانندگی، بدون تغییر در شرایط کلی تردد، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت ایفا کند. همچنین، چارچوب پیشنهادی به دلیل اتکا به داده‌های واقعی و استفاده از روش‌های هوشمند بهینه سازی، از منظر روش شناختی قابلیت تعمیم به سایر شهرها و کاربرد در مطالعات مرتبط با بهینه سازی چرخه رانندگی، مصرف انرژی، آلایندگی و توسعه راهبرد های حمل و نقل پایدار را دارا است.

مراجع

[1] O.A. Huzayyin, H. Salem, M.A. Hassan, A representative urban driving cycle for passenger vehicles to estimate fuel consumption and emission rates under real-world driving conditions, Urban Climate 36 (2021) 100810.

[2] S. Kharazmi, M.P. Shahabiniya, M. Jafari, Simulation and performance analysis of MPI and GDI fuel supply systems in the TU5P engine, in: Proceedings of the 21st Conference on Fluid Dynamics, Bushehr, 2024.

[3] S. Kharazmi, M. Sheykhi, M.P. Shahabiniya, Experimental analysis, turbocharger matching and simulation of the performance of a diesel engine, SSRN (2023), 5521545.

[4] M.P. Shahabiniya, M.H. Khalesi, H. Derakhshan, A. Barimani, M.M. Majd, S.M. Safy, Predicting passenger vehicle emissions under real driving conditions using artificial neural networks, in: Proceedings of the 14th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, 2025.

[5] M.P. Shahabiniya, A. Baghani, A. Vafa, M. Salehi, A.G. Ghalebahman, M. Momeni, Intelligent estimation of emissions and fuel consumption of a light-duty gasoline vehicle using a deep recurrent neural network under real driving conditions, in: Proceedings of the 14th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, 2025.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[6] R.M. Sennefelder, P. Micek, R. Martín-Clemente, J.C. Risquez, R. Carvajal, J.A. Carrillo-Castrillo, Driving cycle synthesis, aiming for realness, by extending real-world driving databases, IEEE Access 10 (2022) 54123–54135.

[7] C. Nitoiu, C. Cofaru, M. Popescu, Influence of road and traffic conditions on emissions and fuel consumption of light vehicles in a real urban driving cycle, Environmental Science and Pollution Research (2025) 1–6.

[8] E. Bagheri, M.M. Tehrani, M. Azadi, A. Moosavian, Impact of driving characteristic parameters and vehicle type on fuel consumption and emissions performance over real driving cycles, PLoS One 20 (1) (2025) e0317098.

[9] C. Armenta-Déu, Environmental impact of urban surface transportation: Influence of driving mode and drivers' attitudes, Pollutants 5 (1) (2025) 5.

[10] G. Lee, J. Yeon, N. Kim, S. Park, A comprehensive methodology for developing and evaluating driving cycles for electric vehicles using real-world data, eTransportation 24 (2025) 100409.

[11] Y. Cui, F. Zou, H. Xu, Z. Chen, K. Gong, A novel optimization-based method to develop representative driving cycle in various driving conditions, Energy 247 (2022) 123455.

[12] A. Kharrazian, M. Saffari, H. Abdi, Impact of drivers' behavior on real-driving fuel consumption and emissions performance based on clustering analysis, Transportation Research Part D: Transport and Environment 99 (2021) 103019.

[13] Y. Zhang, H. Li, M. Guo, Multi-objective optimization of vehicle driving cycles using real-world driving data and NSGA-II algorithm, Energy 239 (2022) 122192.

[14] A. Sciarretta, G. De Nunzio, L.L. Ojeda, Optimal eco-driving control: Energy-efficient driving of road vehicles as an optimal control problem, Control Engineering Practice 20 (2012) 1298–1313.

[15] J. Wang, Z. Chen, Y. Liu, Development of real-world driving cycles using large-scale GPS data and multi-objective optimization techniques, Transportation Research Part D: Transport and Environment 87 (2020) 102500.

[16] M.P. Shahabiniya, S. Kharazmi, R. Saghafi, M.M. Majidi Majd, H. Kamalzade, Experimental investigation of EF7 engine performance using blended fuels of gasoline, toluene, and bioethanol and emission prediction via artificial neural network, Engine (2026) e738343.

[17] S. Kharazmi, M.P. Shahabiniya, A. FakhrAvar, A. Parivar, Investigating the effects of n-butanol–gasoline blends on the performance of the Iranian national engine, Engine 73 (1) (2026) 1–17.

[18] S. Kharazmi, F. Talebi, M.P. Shahabiniya, M.M. Majidi Majd, H. Kamalzade, R. Saghafi, Experimental performance analysis and ANN prediction of emissions in EF7 engines with blended fuels, Journal of Heat and Mass Transfer Research (2026).

[19] J.D. Bishop, C.J. Axon, Using natural driving experiments and Markov chains to develop realistic driving cycles, Transportation Research Part D: Transport and Environment 137 (2024) 104507.

[20] G.G. Sundarkumar, S.B. B.V., C.R. Munigety, A.S. Arora, A time series clustering based approach for construction of real-world drive cycles, Transportation Research Part D: Transport and Environment 97 (2021) 102896.

[21] A. Fotouhi, G.H. Montazeri-Gh, Tehran driving cycle development using the k-means clustering method, Scientia Iranica 20 (2) (2013) 286–293.

[22] Driving cycle extraction of Tehran City's west region for a car with turbocharged engine using microtrip clustering method, Engine 55 (2019) 3–12.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[23] B. Vaziri, A. Malkan, S. Dezianian, A. Aliyari Boroujeni, M. Azadi, The effect of GPS module in mobile phones on road driving data collection on the Semnan–Shahroud route, in: Proceedings of the 13th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, 2023.

[24] A. Malkan, B. Vaziri, A. Aliyari Boroujeni, A. Dadashi, M. Yadollahi, S. Dezianian, Using the K-means algorithm for clustering driving data to examine the impact of data collection equipment type on the Tehran–Semnan route, in: Proceedings of the 13th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, 2023.

[25] A. Aliyari Boroujeni, M. Mohammadzadeh, M. Azadi, Matrix chaos analysis in multi-label classification for the development of the driving cycle in Babol City, in: Proceedings of the 13th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, 2023.

[26] A. Aliyari Boroujeni, B. Vaziri, M. Kianifar, M. Azadi, The effect of driving conditions in a Toyota Prius on developing driving cycles in the city of Semnan, in: Proceedings of the 13th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, 2023.

[27] M. Azadi, S. Dizianian, A. Navi, A. Salmani, T. Qaraati, A. Faraji, Development of a driving cycle based on data recorded from a petrol-electric hybrid vehicle on two routes in Tehran with the K-means algorithm, 2022.

[28] F. Mohammadsadeghi, M. Azadi, M. Masih Tehrani, A. Malekan, A. Keshavarzi, H. Saeidi Googarchin, Clustering and smoothing using real data collected from city buses to extract the driving cycle in Kermanshah city, Engine 71 (2) (2024) 1–17.

[29] M.P. Shahabiniya, A. Davari Dolatabadi, M.H. Khalesi, Development of a local driving cycle for Semnan city based on real-world urban diesel bus fleet data, in: Proceedings of the 14th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, 2025.

[30] A. Aliyari Boroujeni, A. Jarrah, M. Yadollahi, M. Azadi, Comparison of kernel functions in the application of support vector machine algorithm for classification of driving data, in: Proceedings of the 14th International Conference on Internal Combustion Engines, Tehran, Iran, 2025.

[31] E.A. Kharrazian, F. Hadadi, I. Aghayan, Determination of urban emission factors for vehicular tailpipe emissions using driving cycles and cluster-based driver behavior analysis, Eng. 6 (11) (2025) 294.

[32] M.H. Khalesi, A. Hajialimohammadi, M.P. Shahabiniya, H. Kamalzade, A. Davari Dolatabadi, Extraction of the driving cycle of Semnan urban buses using the K-means clustering algorithm and data smoothing of urban fleet data with the Savitzky–Golay filter, Engine (2026) e738621.

ACCEPTED MANUSCRIPT