Journal of Industrial Innovations 3(3) (2025) 61 – 82

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Performance Analysis of a Hybrid Tracked Sprocket Wheeled Vehicle for Improving Energy Consumption Efficiency

Shaygan Shahed Haghighi [a], Seyed Hadi Hosseini [b], Shahriar Shahed [c], Jalal Joudaki[d]*

[a] Department of Body and Structure, School of of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[b] Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[c] Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
[d] Department of Solid Mechanics, School of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Shahed Haghighi Sh, Hosseini S H, Shahed Sh, Joudaki J. Performance Analysis of a Hybrid Tracked Sprocket Wheeled Vehicle for Improving Energy Consumption Efficiency. Industrial Innovations. 2025;3 (3):61-82.

https://doi.org/10.61882/jii.3.3.61

KEYWORDS

Hybrid tracked vehicle;
Electric motor;
Fuel efficiency improvement;
Hybrid energy management;
Miles per gallon gasoline equivalent (MPGe).

ABSTRACT

By increasing the need to reduce pollution, improve performance, and increase fuel efficiency in heavy-duty vehicles, the use of hybrid-electric systems has gained attention as an innovative and effective solution. This research aims to improve the energy consumption and select an appropriate configuration for a hybrid tracked vehicle. Initially, various architectures of hybrid systems will be analyzed, and the most suitable configuration will be identified. Then, a dynamic model of the tracked vehicle will be developed by using MATLAB software, and a step-by-step design algorithm, including determining initial requirements, mathematical modeling, selecting key components, and implementing an energy management controller, will be simulated. The final model will be validated with data from a reference to evaluate the accuracy. Simulation results showed that the series hybrid configuration performed better in terms of battery state of charge stability compared to the parallel architecture, providing approximately 18% superiority in maintaining battery charge level. Additionally, to improve power system stability and reduce electrical load on the battery, a supercapacitor was used as a complementary energy storage element, which increases the operation time in electric driving mode by approximately 8 minutes, indicating better instantaneous power management and reduced electrical load on the battery. Furthermore, a comparison of multi-speed gearboxes with two-speed types showed that the multi-speed gearboxes lead to significant improvements in energy consumption efficiency by providing the possibility of optimal gear selection. The findings of this research can serve as a valuable basis for the future design and development of advanced heavy-duty hybrid vehicles.

Extended Abstract

1. Introduction

Tracked vehicles have many applications; these vehicles generally use internal combustion engines (ICEs), due to high weight and special operational requirements, are known for high fuel consumption and significant emissions. Considering the global effort to reduce emissions, improve fuel efficiency, and increase operational capability, attention to hybridization technologies in this class of vehicles has risen markedly. Hybridizing heavy tracked vehicles brings notable benefits, including reduced emissions, improved output torque, lower fuel consumption, and increased operational range [1]. By integrating electric systems alongside traditional internal combustion powerplants, it is possible to recover energy during

* Corresponding author.
E-mail address: joudaki@arakut.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.61882/jii.3.3.61
Received: November 13, 2025; Received in revised form: Junuary 29, 2026; Accepted: Junuary 29, 2026.
Article type: Research Paper

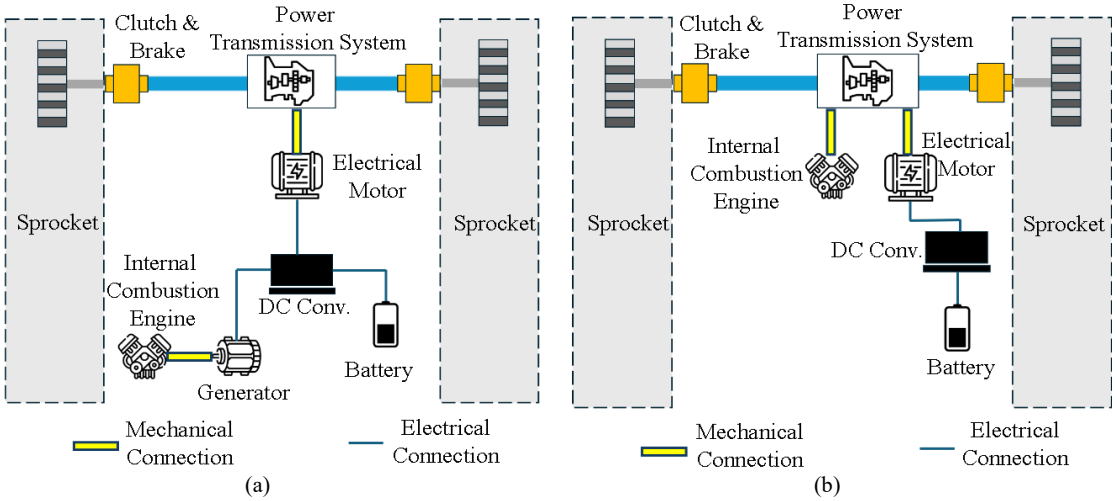
deceleration and braking, manage peak power, and optimize engine performance. In addition, the high torque characteristic of electric motors makes them an ideal option for the traction demands of tracked vehicles, which require high pulling force on difficult terrain [2]. Tracked vehicles are made up of complex mechanical and electronic components that must be precisely coordinated for effective performance under harsh conditions. The main components of these vehicles include the propulsion system (internal combustion or electric motor), the power transmission system, the track-based running gear, a heavy-duty suspension system, energy storage such as batteries, and control equipment for managing energy and movement [3, 4]. Another notable advantage of hybrid powertrain systems in these vehicles is the ability to move silently. The capability to travel quietly without producing internal combustion engine noise is a critical benefit. Hybrid systems make it possible for the vehicle to operate over short distances or under certain conditions using only the electric motor, without generating acoustic pollution [8]. Also, the use of advanced energy storage systems such as lithium batteries and fast-charging supercapacitors has effectively enabled meeting the instantaneous power demands of the powertrain and high-consumption auxiliary equipment. The combination of these elements significantly improves the overall performance of hybrid tracked vehicles on rough terrain and under various operating conditions [1, 9, 10].

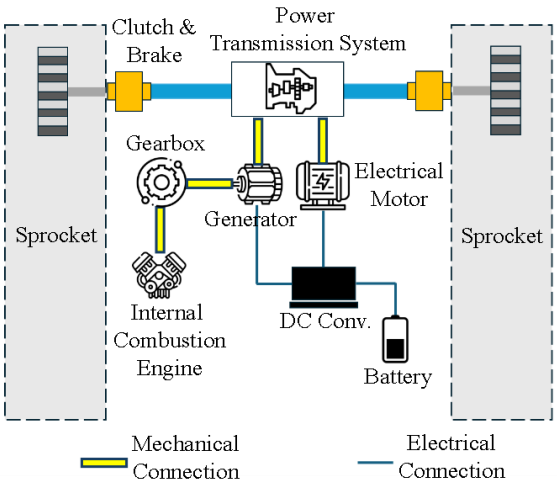
This study was carried out to design, simulate, and evaluate the performance of a hybrid powertrain and ultimately optimize it for a tracked vehicle. In this paper, the dynamic modeling and analysis of the power transmission architecture, energy distribution, and component layout of the hybrid propulsion system in a tracked vehicle are examined. To this end, various hybrid system configurations were compared and evaluated not only from the perspective of conceptual architecture but also based on dynamic behavior, energy management, and operational performance. Additionally, by employing energy storage technologies such as lithium-ion batteries and supercapacitors, the role of these components in improving state of charge (SOC) stability, reducing fuel consumption, and enhancing system responsiveness to transient loads was analyzed in detail. The simulations for this research were conducted in the MATLAB/Simulink environment, and the model's validation was assessed using real-world data from reference [1].

2. Types of hybrid-electric powertrain configurations

In hybrid-electric vehicles, the arrangement of the internal combustion engine and the electric motor in the powertrain determines the energy management strategy, which is implemented in three configurations: series, parallel, and series-parallel. In a series hybrid system, the internal combustion engine is not mechanically connected to the drive wheels. Instead, it powers a generator that produces electricity or charges a battery, which supplies an electric motor that drives the wheels. This architecture allows the combustion engine to operate in its optimal efficiency range independently of vehicle speed. The main advantages of the series configuration include mechanical simplicity, effective regenerative braking, and the ability to operate in all-electric mode, making it ideal for quiet propulsion in a variety of applications. However, energy conversion losses (from mechanical to electrical and back to mechanical) can slightly reduce its overall efficiency during steady high-speed driving. Figure 1-a shows the series configuration of a hybrid vehicle.

Figure 1-b shows the parallel architecture for a hybrid vehicle. In a parallel hybrid architecture, both the internal combustion engine and the electric motor are mechanically connected to the drivetrain and can deliver power to the wheels independently or simultaneously. Parallel hybrids typically exhibit better overall drivetrain efficiency under steady operating conditions, but they offer less flexibility in regenerative braking and all-electric driving compared with series systems. Figure 1-c shows the series-parallel architecture for a hybrid vehicle. The series-parallel or power-split configuration combines the features of both series and parallel systems. This system uses a set of planetary gears (a gearbox) or a power-split device to divide the engine's power between the wheels and the generator. This architecture enables seamless switching between series and parallel modes depending on driving conditions.





(c)

Figure 1 Different hybrid vehicle architecture a) series, b) parallel, c) series-parallel configuration

3. Algorithm Design Modeling

Using the Simscape library in this paper enabled a realistic simulation of mechanical, electrical, and thermal components such as the internal combustion engine, electric motor, gearbox, battery, and ultracapacitor. Moreover, the ability to define efficiency maps and use experimental data raises the modeling accuracy to an industrial level. Figure 2 shows the model simulated in the MATLAB/Simulink environment.

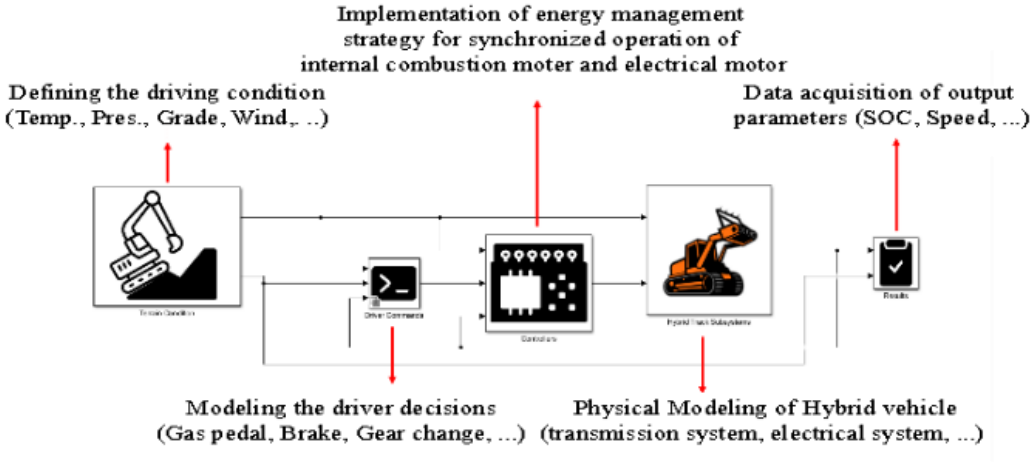


Figure 2 Simulation model of a hybrid tracked vehicle in the MATLAB/Simulink environment

In this paper, the fundamental functional performance characteristics of the tracked vehicle were selected according to the data given in Table 1. The driving cycle used in this paper was extracted from reference [1], which was specifically designed to simulate the challenging operational conditions of tracked vehicles.

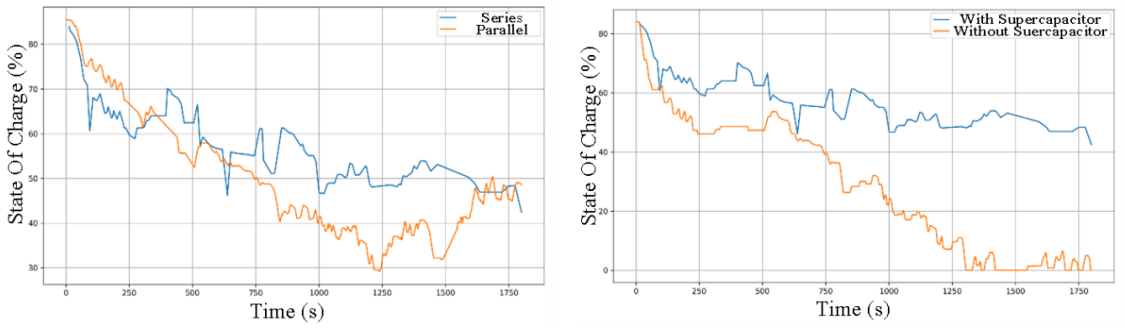
Table 1 Modeled Tracked Vehicle Characteristics

Parameter	Value
Maximum Speed	65 km/h
Slope climbing capability	60 %
Acceleration from 0 to 32 km/h	Less than 8 s
Silent operational range	25 km at 25 km/h speed

4. Results and discussion

After implementing the model validation, a comparative simulation study between series and parallel hybrid architectures under identical conditions was conducted. Figure 3 shows the state-of-charge (SOC) curves for both the series and parallel configurations. The results indicate that the series configuration maintains a more stable and higher SOC, which implies better energy recovery efficiency (due to the electric motor's continual engagement with the wheels during braking) and more efficient utilization of the electric drivetrain under varying conditions. 18% improvement of the SOC index was observed in the series

architecture compared to the parallel configuration. The effect of using a supercapacitor was simulated under identical driving conditions. Adding the supercapacitor markedly improves peak power sustainment, which reduces stress on the battery during high-acceleration climbs on steep grades. This model uses a supercapacitor with a maximum power of 280 kW, a nominal voltage of 250 V, and an energy capacity of 0.27 kWh. Adding a supercapacitor to the energy storage system reduced battery level of discharge by about 15%, smoothed SOC fluctuations by up to 22% compared with the no-supercapacitor case, and increased pure-electric driving time by about 4.5 minutes.



(a) (b)

Figure 3 a) Comparing SOC for series and parallel configurations, b) with and without supercapacitor

5. Conclusion

In this paper, a design and modeling framework was developed and implemented to evaluate and optimize different architectures of hybrid powertrain systems in tracked vehicles. After reviewing common configurations in the hybrid vehicle industry, the effect of hybrid configuration was simulated and compared in the MATLAB/Simulink environment. The comparisons of the architectures show that the series configuration showed better performance than the parallel architecture; an improvement of about 18% was observed in the SOC index. Adding a supercapacitor to the energy storage system reduced battery level of discharge by about 15%, smoothed SOC fluctuations by up to 22% compared to the system without a supercapacitor, and increased pure-electric driving time by approximately 4.5 minutes. In addition, using a multi-speed gearbox led to a 20% improvement in optimal energy consumption compared to a two-speed system.

نوآوری‌های صنعتی، دوره ۳، شماره ۳، سال ۱۴۰۴، صفحات ۶۱ تا ۸۲

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

تحلیل عملکرد یک نمونه خودروی شنی‌دار هیبریدی به‌منظور بهبود راندمان مصرف انرژی

شایگان شاهدحقیقی [الف]، سید هادی حسینی [ب]، شهریار شاهد [ج]، جلال جودکی [د*]

[الف] گروه سازه و بدنه خودرو ، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. shayegan_shahed@alumni.iust.ac.ir

[ب] گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. hadi_hosseini@alumni.iust.ac.ir

[ج] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. shahriyar206shahed@gmail.com

[د] گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران. joudaki@arakut.ac.ir

واژگان کلیدی

خودروی شنی‌دار هیبریدی؛ موتور الکتریکی؛ بهبود راندمان مصرف؛ مدیریت انرژی هیبریدی؛ شاخص مصرف سوخت معادل.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

چکیده

داده‌های یک مقاله مرجع اعتبارسنجی می‌شود تا صحت آن بررسی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پیکربندی هیبریدی سری در مقایسه با معماری موازی، در شاخص پایداری وضعیت شارژ باتری عملکرد بهتری داشته و حدود ۱۸٪ برتری در حفظ سطح شارژ باتری ارائه داده است. همچنین، به‌منظور بهبود پایداری سیستم قدرت و کاهش تنش‌های وارده بر باتری از ابرخازن به‌عنوان یک عنصر مکمل ذخیره‌ساز انرژی استفاده گردید که موجب افزایش حدود ۸ دقیقه‌ای در مدت‌زمان عملیات در حالت رانندگی الکتریکی شده است که نشان‌دهنده مدیریت بهتر توان لحظه‌ای و کاهش فشار بر باتری است. همچنین، مقایسه گیربکس چندسرعته با نوع دوسرعته نشان داد که گیربکس چندسرعته با فراهم‌آوردن امکان انتخاب دنده بهینه، منجر به بهبود قابل‌توجه در راندمان مصرف انرژی می‌گردد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی ارزشمند برای طراحی و توسعه آتی خودروهای هیبریدی سنگین با عملکرد پیشرفته باشد.

۱- مقدمه

خودروهای شنی‌دار کاربردهای بسیاری دارند، از جمله تجهیزات عمرانی، ماشین‌آلات کشاورزی و تجهیزات استخراج معادن، این خودروها از ارکان اصلی توسعه زیرساخت‌های جهانی، تولید مواد غذایی، استخراج منابع و فرآوری مواد محسوب می‌شوند. این وسایل نقلیه عموماً از پیشرانه‌های احتراق داخلی[1] بهره می‌برند که به دلیل وزن بالا و نیازهای عملیاتی ویژه، با مصرف سوخت زیاد و تولید آلایندگی قابل‌توجه شناخته می‌شوند. با توجه به تلاش جهانی در جهت کاهش آلایندگی، بهبود مصرف سوخت و افزایش توان عملیاتی، توجه به فناوری‌های هیبریدی‌سازی در این دسته از وسایل نقلیه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. هیبریدی‌سازی وسایل نقلیه سنگین شنی‌دار مزایای قابل‌توجهی را به همراه دارد، ازجمله کاهش آلایندگی، بهبود گشتاور خروجی، کاهش مصرف سوخت و افزایش برد عملیاتی [۱]. با ادغام سیستم‌های الکتریکی در کنار پیشرانه‌های احتراق داخلی سنتی، امکان بازیابی انرژی در هنگام کاهش سرعت و ترمزگیری، مدیریت توان اوج و عملکرد بهینه موتور فراهم می‌شود. افزون بر این، ویژگی گشتاور بالای موتورهای الکتریکی، آن‌ها را برای نیازهای حرکتی وسایل نقلیه شنی‌دار که مستلزم نیروی کششی بالا در مسیرهای

[1] Internal Combustion Engine (ICE)

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: joudaki@arakut.ac.ir

دشوار هستند، به گزینه‌ای ایده‌آل تبدیل کرده است [۲]. خودروهای شنی‌دار از اجزای مکانیکی و الکترونیکی پیچیده‌ای تشکیل‌شده‌اند که هماهنگی دقیق بین آن‌ها برای عملکرد مؤثر در شرایط سخت ضروری است. اجزای اصلی این خودروها شامل سامانه پیشرانه (موتور احتراق داخلی یا الکتریکی)، سیستم انتقال قدرت، سیستم حرکتی مبتنی بر زنجیر، سیستم تعلیق قدرتمند، ذخیره‌سازهای انرژی مانند باتری و تجهیزات کنترلی برای مدیریت انرژی و حرکت هستند. همچنین سامانه‌های جانبی مانند سیستم تهویه قوی، تجهیزات ناوبری و حفاظت زرهی نیز به‌عنوان بخش‌های حیاتی در ساختار کلی در نظر گرفته می‌شوند. طراحی بهینه این اجزا و یکپارچه‌سازی مؤثر آن‌ها نقشی کلیدی در افزایش کارایی، استقامت، و قابلیت مانور خودروی شنی‌دار دارد [۴،۳].

خودروهای شنی‌دار به دلیل قابلیت‌های منحصربفرد خود در عبور از زمین‌های ناهموار و شرایط سخت، نقش حیاتی در صنایع مختلف ایفا می‌کنند. این خودروها در حوزه‌های گوناگونی از جمله ساخت‌وساز، کشاورزی، معدن، نظامی و حمل‌ونقل سنگین مورداستفاده قرار می‌گیرند و با توجه به نیاز روزافزون به بهره‌وری بالاتر و کاهش آلایندگی، توسعه فناوری‌های نوین در این زمینه به یکی از اولویت‌های تحقیقاتی تبدیل‌شده است. در بخش کشاورزی، خودروهای شنی‌دار مانند تراکتورهای کشاورزی، به‌ویژه در زمین‌های نرم و مرطوب که نیاز به فشار کم بر سطح زمین و کشش بالا دارند، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. امروزه با توجه به روند رو به رشد الکتریکی سازی، تراکتورهای هیبریدی الکتریکی[1] به دلیل مزایایی همچون مصرف سوخت بهینه، کنترل‌پذیری بهتر و کاهش انتشار آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن (NOx) و مونوکسید کربن (CO)، موردتوجه ویژه قرار گرفته‌اند [۵]. در صنعت معدن نیز خودروهای شنی‌دار، به‌ویژه کامیون‌های حمل‌ونقل الکتریکی، بیل‌های مکانیکی الکتریکی و دستگاه‌های حفاری، نقش کلیدی در افزایش بهره‌وری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. استفاده از فناوری‌های هیبریدی و تمام الکتریکی در این بخش، همراه با توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند، منجر به بهبود کارایی و پایداری محیط‌زیست شده است [۶]. علاوه بر این، در بخش‌های نظامی و ساخت‌وساز، خودروهای شنی‌دار به دلیل تحرک منحصربه‌فرد و کارآمد در زمین‌های ناهموار و صعب‌العبور، همچنان جایگزینی ندارند. بهینه‌سازی سیستم‌های محرکه هیبریدی در این نوع خودروها، مزایای متعددی فراتر از بهبود راندمان سوخت به همراه داشته است. به‌طور خاص، هیبریدی‌سازی امکان بهبود چشمگیر در مانورپذیری را فراهم آورده است، زیرا موتورهای الکتریکی می‌توانند گشتاور فوری و دقیقی را در اختیار راننده قرار دهند [۷]. یکی دیگر از مزایای برجسته سیستم‌های محرکه هیبریدی در این خودروها، قابلیت تحرک بی‌صدا است. توانایی حرکت بی‌صدا و بدون تولید صدای موتور احتراق داخلی، یک مزیت حیاتی محسوب می‌شود. سیستم‌های هیبریدی این امکان را فراهم می‌کنند که خودرو در مسافت‌های کوتاه یا در شرایط خاص، صرفاً با استفاده از موتور الکتریکی و بدون ایجاد آلودگی صوتی حرکت کند [۸]. همچنین، به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی پیشرفته مانند باتری‌های لیتیومی با چگالی انرژی بالا و ابرخازن‌ها باقابلیت شارژ سریع، پاسخگویی به نیازهای توانی لحظه‌ای سیستم محرکه و تجهیزات جانبی پرمصرف را به نحو مؤثری ممکن ساخته است. ترکیب این عناصر، عملکرد کلی خودروهای شنی‌دار هیبریدی را در زمین‌های ناهموار و در شرایط عملیاتی گوناگون به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌بخشد [۱۰،۹،۱].

باوجود مزایای آشکار فناوری هیبریدی در این دسته از خودروها، تعیین پیکربندی بهینه سامانه هیبریدی برای کاربردهای شنی‌دار همچنان چالشی اساسی به شمار می‌رود. تفاوت‌ها و محدودیت‌های ذاتی معماری‌های هیبریدی سری و موازی، لزوم انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای جامع را برای کاربردهای ویژه وسایل نقلیه شنی‌دار برجسته می‌سازد. برای مواجهه مؤثر با این چالش‌ها و بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های الکتریکی‌سازی در این حوزه، انجام مقایسه‌های سیستماتیک عملکردی میان پیکربندی‌های مختلف سامانه‌های هیبریدی الکتریکی برای خودروهای شنی‌دار سنگین، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مسیر توسعه آینده به شمار می‌آید. در همین راستا، پژوهش حاضر باهدف طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکردی پیشرانه هیبریدی و در نهایت بهینه‌سازی آن برای یک خودروی شنی‌دار انجام‌گرفته است. در این مقاله، مدل‌سازی دینامیکی و تحلیل ساختار انتقال توان، توزیع انرژی و چیدمان اجزای سیستم محرکه هیبریدی در یک خودروی شنی‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پیکربندی‌های مختلف سیستم‌های هیبریدی نه‌تنها از منظر معماری مفهومی، بلکه بر اساس رفتار دینامیکی، مدیریت

[1] Hybrid Electric Agricultural Tractors (HEATs)

انرژی و عملکرد عملیاتی مقایسه و ارزیابی شده‌اند. همچنین، با بهره‌گیری از فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی نظیر باتری لیتیومی و ابرخازن، تلاش شده است تا نقش این اجزاء در بهبود پایداری وضعیت شارژ[1]، کاهش مصرف سوخت و ارتقای پاسخ‌گویی سیستم به بارهای لحظه‌ای مورد تحلیل دقیق قرار گیرد. شبیه‌سازی‌های این پژوهش در محیط سیمولینک متلب انجام شده و اعتبار مدل با استفاده از داده‌های واقعی از یک مقاله مرجع [۱] بررسی شده است.

تمرکز اصلی این پژوهش بر بررسی تأثیر چیدمان اجزای سیستم، مسیرهای انتقال توان الکتریکی–مکانیکی و استراتژی‌های ذخیره‌سازی انرژی بر مصرف انرژی، پایداری وضعیت شارژ و کارایی کلی سیستم محرکه می‌باشد در این مقاله ابتدا به معرفی انواع پیکربندی‌های خودروهای هیبریدی و کاربردهای آن‌ها در خودروهای شنی‌دار پرداخته می‌شود. سپس الگوریتم طراحی پیشنهادی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بخش‌های موردنظر تشریح می‌گردد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی شامل مقایسه عملکرد معماری‌های مختلف، ارزیابی اثرات استفاده از ابرخازن و تحلیل سیستم‌های انتقال قدرت ارائه می‌شود.

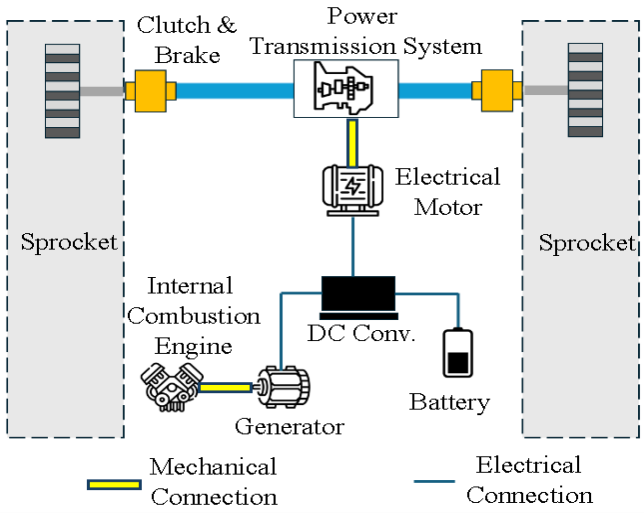
۲- انواع پیکربندی‌های سیستم محرکه هیبریدی - الکتریکی

امروزه تکنولوژی‌های زیادی برای افزایش رفتار دینامیکی و پایداری خودروهای سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. خودروهای هیبریدی-الکتریکی[2] با تلفیق موتورهای احتراق داخلی و سیستم‌های پیشرانه الکتریکی، به بهبود بازدهی سوخت، کاهش آلایندگی و ارتقای عملکرد در سناریوهای مختلف عملیاتی می‌پردازند. معماری سیستم هیبریدی - یعنی نحوه چیدمان موتور احتراقی و موتور الکتریکی در خط انتقال قدرت - نقش محوری در تعیین استراتژی مدیریت انرژی، پیچیدگی مکانیکی و تناسب کاربردهای مختلف مانند شرایط شهری، خارج از جاده یا نظامی دارد. در زمینه خودروهای شنی‌دار، انتخاب بهینه‌ترین معماری هیبریدی برای تضمین تحویل گشتاور مطمئن، بازیابی انرژی و عملکرد بی‌صدا در شرایط سخت ضروری است [۴].

۲-۱- پیکربندی هیبریدی سری

شکل ۱ معماری سری برای خودرو هیبریدی را نشان می‌دهد. در سیستم هیبریدی سری، موتور احتراق داخلی به‌صورت مکانیکی به چرخ‌های محرک متصل نیست. در عوض، یک ژنراتور را تغذیه می‌کند که برق تولید شده یا باتری را شارژ می‌کند که موتور الکتریکی محرک چرخ‌ها را تغذیه می‌نماید. این معماری به موتور احتراق اجازه می‌دهد در محدوده بازدهی بهینه خود مستقل از سرعت خودرو عمل کند. مزایای اصلی پیکربندی سری شامل سادگی مکانیکی، ترمز احیاکننده مؤثر و توانایی عملکرد در حالت تمام الکتریکی است که آن را برای تحرک بی‌صدا در کاربردهای مختلف ایده‌آل می‌سازد. بااین‌حال، تلفات تبدیل انرژی (از مکانیکی به الکتریکی و بازگشت به مکانیکی) می‌تواند بازدهی کلی آن را در رانندگی با سرعت ثابت بالا، کمی کاهش دهد.

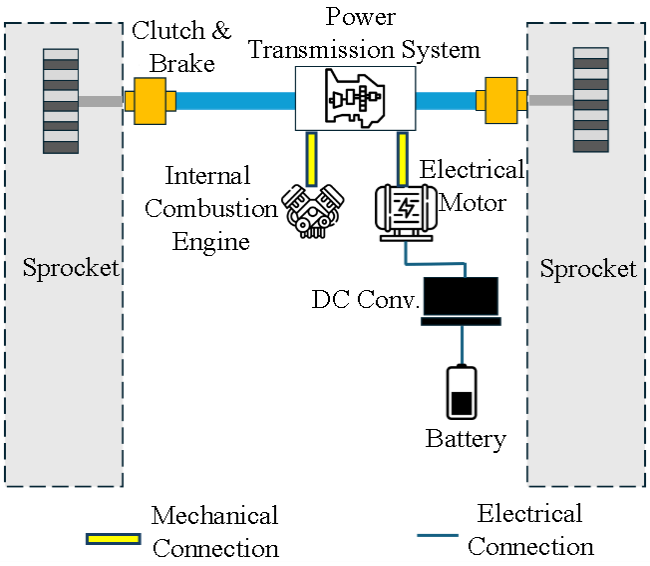
[1] State of Charge (SOC)
[2] Hybrid Electric Vehicles (HEVs)



شکل ۱ معماری خودروی هیبریدی سری

۲-۲- پیکربندی هیبریدی موازی

شکل ۲ معماری موازی برای خودرو هیبریدی را نشان می‌دهد. در معماری هیبریدی موازی، هر دو موتور احتراق داخلی و موتور الکتریکی از نظر مکانیکی به خط انتقال قدرت متصل هستند و می‌توانند به‌صورت مستقل یا هم‌زمان به چرخ‌ها نیرو منتقل کنند. این پیکربندی امکان پیشرانه مستقیم توسط موتور احتراقی را فراهم می‌کند که در سرعت‌های بالا و شرایط جاده‌ای یا تقاضاهای توان پایدار کارآمد است. هیبریدهای موازی معمولاً بازدهی کلی خط انتقال قدرت بهتری در شرایط کار پایدار را نشان می‌دهند، اما انعطاف‌پذیری کمتری در ترمز احیاکننده و رانندگی تمام الکتریکی در مقایسه با سیستم‌های سری دارند. استراتژی کنترل به دلیل تصمیم‌گیری‌های تقسیم قدرت و مدیریت دنده بین موتور احتراقی و موتور الکتریکی پیچیده‌تر است.

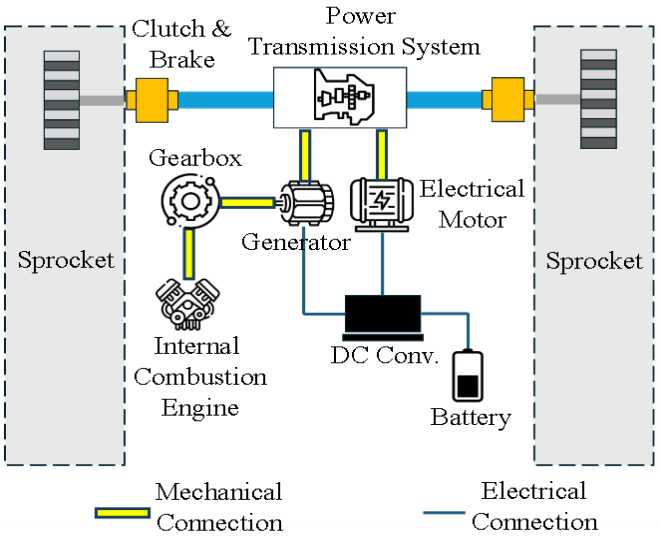


شکل ۲ معماری خودروی هیبریدی موازی

۲-۳- پیکربندی هیبریدی سری - موازی

شکل ۳ معماری سری-موازی برای خودرو هیبریدی را نشان می‌دهد. پیکربندی سری-موازی یا تقسیم قدرت، ویژگی‌های هر دو سیستم سری و موازی را ترکیب می‌کند. این سیستم از یک مجموعه چرخ‌دنده (گیربکس) سیاره‌ای یا دستگاه تقسیم

قدرت برای تقسیم توان موتور بین چرخها و ژنراتور استفاده می‌کند. این معماری امکان تعویض یکپارچه بین حالت‌های سری و موازی بسته به شرایط رانندگی را فراهم می‌کند. این سیستم بهینه‌سازی پویای بار موتور، بهبود اقتصاد سوخت و انعطاف‌پذیری بیشتر در مدیریت قدرت را ممکن می‌سازد. بااین‌حال، پیچیدگی مکانیکی و نیازهای بالاتر سیستم کنترل تناسب بهتری برای خودروهای هیبریدی پیشرفته دارد.



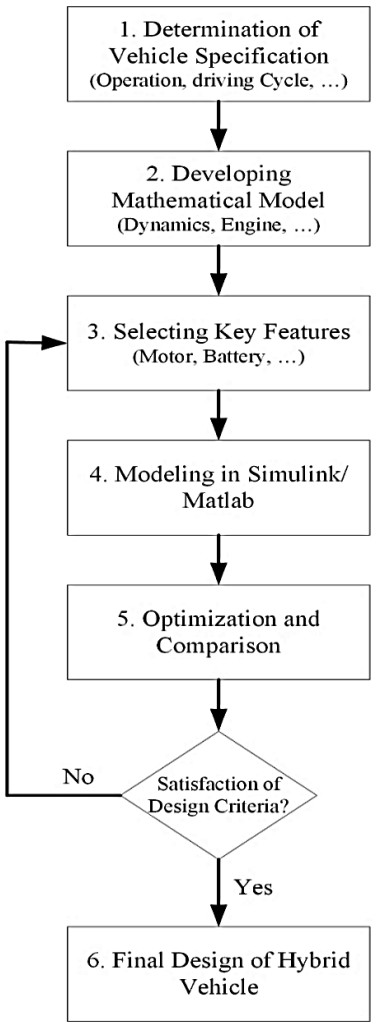
شکل ۳ معماری خودروی هیبریدی سری - موازی

در میان پیکربندی‌های متداول خودروهای هیبریدی-الکتریکی (سری، موازی و سری-موازی)، پیکربندی سری به دلایل متعددی به‌عنوان گزینه بهینه برای خودروهای شنی‌دار شناخته می‌شود. این معماری با ارائه انعطاف‌پذیری بالا در چیدمان اجزاء، امکان بهینه‌سازی فضای موجود را فراهم می‌کند، همچنین، کاهش پیچیدگی مکانیکی در این پیکربندی، قابلیت اطمینان سیستم را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۱۲،۱۳]. از طرفی، ظرفیت توان بالاتر باتری در این سیستم، برق بیشتری را برای تجهیزات الکترونیکی و عملیاتی خودرو فراهم می‌سازد. اگرچه پیکربندی موازی با ارائه قابلیت حرکت در حالت خرابی (Limp-Home Mode) در صورت ازکارافتادن موتور الکتریکی مزیت نسبی دارد، اما استفاده بهینه از پیکربندی سیستم‌های سری-موازی پیچیدگی بدلیل پیچیدگی‌های مکانیکی و کنترلی سیستم‌های سری-موازی، با محدودیت‌هایی مواجه است. نتایج مقایسه‌ای مبتنی بر این معیارها مانند پیچیدگی مکانیکی، عملکرد بی‌صدا، برد عملیاتی، بهره‌برداری از فضای داخلی و توان الکتریکی موجود به‌وضوح نشان می‌دهد که پیکربندی سری با توجه به‌سادگی طراحی، قابلیت اطمینان بالا و انعطاف‌پذیری عملیاتی، بهترین گزینه برای خودروهای شنی‌دار هیبریدی-الکتریکی محسوب می‌شود. این مزایا به‌ویژه در کاربردهایی که نیازمند تحرک پنهان، استقامت عملیاتی و قابلیت‌های پیشرفته الکترونیکی هستند، نمود بیشتری پیدا می‌کنند [۱۴].

۳- مدل‌سازی الگوریتم‌های طراحی

در این مقاله، الگوریتم طراحی سیستماتیکی برای مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد خودروی شنی‌دار هیبریدی-الکتریکی توسعه‌یافته است. این الگوریتم با تلفیق الزامات مهندسی، انتخاب معماری سیستم محرکه هیبریدی، اندازه‌گذاری اجزاء و شبیه‌سازی در یک چارچوب گام‌به‌گام، طراحی نهایی را با معیارهای عملیاتی مأموریت‌محور و اهداف بهینه‌سازی انرژی همسو می‌سازد. طراحی یک خودروی شنی‌دار هیبریدی نیازمند رویکردی ساختاریافته و مرحله‌به‌مرحله است که بتواند هماهنگی کامل میان اجزاء مختلف سیستم از جمله موتور احتراق، موتور الکتریکی، سامانه ذخیره انرژی، سیستم انتقال قدرت و استراتژی کنترلی را تضمین کند. الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله به‌عنوان چارچوبی نظام‌مند عمل می‌کند که با هدایت فرایند انتخاب معماری، تعیین مشخصات فنی، مدل‌سازی ریاضی، پیاده‌سازی در محیط نرم‌افزار و ارزیابی عملکرد، توسعه خودروی هیبریدی را در راستای

الزامات عملیاتی و اهداف بهینه‌سازی انرژی تسهیل می‌نماید. شکل ۴ مراحل اصلی مدل‌سازی را به‌صورت یک نمودار نشان می‌دهد. در ادامه، هر یک از این مراحل به‌تفصیل تشریح خواهد شد.



شکل ۴ فلوچارت طراحی الگوریتم خودروی شنی‌دار هیبریدی

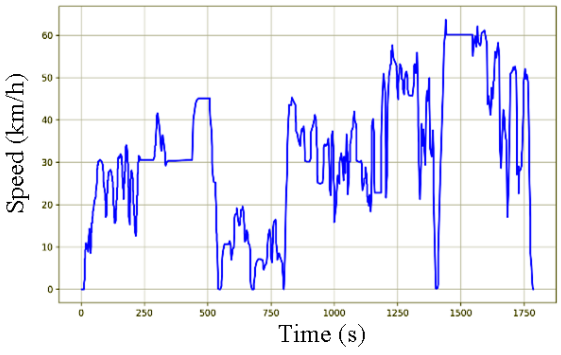
۳-۱- تعیین مشخصات خودرو

فرایند طراحی با شناسایی نیازمندی‌های کلیدی عملکردی مبتنی بر کاربردهای خودروی شنی‌دار آغاز می‌شود. این الزامات، مبنای انتخاب اجزاء و معماری سیستم در مراحل بعدی قرار می‌گیرند. در این مقاله ویژگی‌های اساسی عملکردی خودروی شنی‌دار مطابق اطلاعات درج شده در جدول ۱ انتخاب شده است.

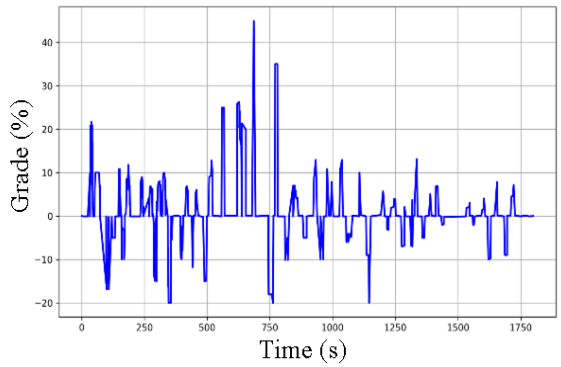
جدول ۱ ویژگی‌های خودروی شنی‌دار مدل شده

Parameter	Value
Maximum Speed	65 km/h
Slope climbing capability	60 %
Acceleration from 0 to 32 km/h	Less than 8 s
Silent operational range	25 km at 25 km/h speed

سیکل رانندگی مورداستفاده در این مقاله مطابق شکل ۵ بوده و از اطلاعات مرجع [۱] استخراج شده است که به‌صورت ویژه برای شبیه‌سازی شرایط چالش‌برانگیز عملیاتی خودروهای شنی‌دار طراحی‌شده است. این سیکل با دربرگرفتن طیف کاملی از سناریوهای عملیاتی شامل شتاب‌گیری‌های ناگهانی، ترمزهای شدید، تغییرات مکرر سرعت و عبور از شیب‌های تند، امکان ارزیابی جامع عملکرد سیستم‌های هیبریدی را فراهم می‌سازد. طراحی هوشمندانه این سیکل نه‌تنها پاسخ‌دهی دینامیکی سیستم را مورد آزمایش قرار می‌دهد، بلکه کارایی مدیریت انرژی و قابلیت‌های بازیابی انرژی را در شرایط عملیاتی سخت و واقع‌گرایانه محک می‌زند. انتخاب این سیکل به‌عنوان مبنا، اعتبار علمی نتایج را تضمین نموده و اطمینان حاصل می‌کند که یافته‌های پژوهش قابلیت تعمیم به شرایط واقعی حرکت را دارا می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۵ پروفایل سیکل رانندگی از مرجع [۱]، الف) سرعت-زمان ب) شتاب-زمان

۳-۲- توسعه مدل‌های ریاضی

برای تحلیل دقیق رفتار دینامیکی، مصرف انرژی و عملکرد سیستم‌های پیشرانه در خودروی شنی‌دار هیبریدی-الکتریکی، سه مدل ریاضی اصلی در این مقاله توسعه داده شد که به‌صورت یکپارچه در محیط متلب پیاده‌سازی گردید. این مدل‌ها به‌صورت ماژولار طراحی شدند تا امکان اصلاح، گسترش و بهینه‌سازی در مراحل مختلف توسعه فراهم گردد.

- مدل دینامیک خودرو:

این مدل با استفاده از قوانین پایه مکانیک، به محاسبه نیروهای موردنیاز برای حرکت خودرو در شرایط مختلف می‌پردازد. نیروهای مقاومت شامل مقاومت غلطشی، نیروی پسا (Drag)، آیرودینامیکی و مقاومت ناشی از شیب (Grade Resistance) در این مدل لحاظ شده‌اند. با استفاده از قانون دوم نیوتن، نیروی کشش موردنیاز برای دستیابی به شتاب مطلوب محاسبه می‌گردد. همچنین این مدل به‌عنوان ورودی برای تعیین گشتاور خروجی موردنیاز از سیستم پیشرانه استفاده می‌شود.

در این پژوهش، دینامیک خودرو به‌صورت مدل طولی تک‌درجه آزادی در نظر گرفته شده است که حرکت خودرو در راستای طولی را توصیف می‌کند. در این مدل، قیود حرکتی اصلی شامل نیروی مقاوم آیرودینامیکی، مقاومت غلتشی، نیروی شیب مسیر و محدودیت‌های توان و گشتاور اجزای سیستم محرکه لحاظ شده‌اند. با توجه به هدف اصلی پژوهش که تحلیل معماری سیستم محرکه، توزیع توان و مدیریت انرژی می‌باشد، لحاظ کردن درجه‌های آزادی عمودی و جانبی در این مرحله ضروری نبوده و تأثیر آن‌ها به‌صورت غیرمستقیم از طریق بار مقاوم معادل در مدل طولی اعمال شده است.

- مدل سیستم محرکه:

این مدل اجزای کلیدی پیشرانه را شامل موتور احتراق داخلی، موتور الکتریکی، باتری، ابرخازن، مبدل‌های DC/DC و سیستم انتقال قدرت (دوسرعته یا چندسرعته) مدل‌سازی می‌کند. برای هر جزء، منحنی‌های عملکردی شامل بازدهی، توان، گشتاور و محدودیت‌های فیزیکی در نظر گرفته شده‌اند. باتری و ابرخازن به‌صورت مدل‌های مبتنی بر ظرفیت و مقاومت داخلی تعریف‌شده‌اند تا پاسخ دقیق‌تری در برابر چرخه‌های شارژ و تخلیه ارائه دهند. همچنین، رفتار دینامیکی موتورهای الکتریکی و مکانیزم انتقال قدرت در پاسخ به شرایط رانندگی پیاده‌سازی شده‌اند.

- مدل استراتژی کنترل:

این مدل وظیفه مدیریت انرژی را در کل سیستم برعهده دارد. از یک الگوریتم قانون‌محور برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه توزیع توان بین موتور احتراق داخلی و موتور الکتریکی استفاده شده است. این استراتژی شامل منطق انتخاب حالت رانندگی (الکتریکی، ترکیبی، یا احتراقی)، اجرای ترمز احیاکننده، کنترل محدوده SOC باتری و ابرخازن و تعویض دنده در سیستم انتقال قدرت می‌باشد. عملکرد این مدل مستقیماً بر بهره‌وری سوخت، عملکرد حرکتی و طول عمر اجزای ذخیره‌سازی انرژی تأثیرگذار است.

ادغام این سه مدل در یک چارچوب شبیه‌سازی دقیق، امکان ارزیابی همه‌جانبه سیستم پیشرانه هیبریدی را فراهم آورده و بستر مناسبی برای انجام تحلیل‌های عملکردی، بهینه‌سازی، و اعتبارسنجی نتایج فراهم می‌کند.

۳-۳- انتخاب اجزای کلیدی

در طراحی سیستم محرکه هیبریدی برای یک خودروی شنی‌دار، انتخاب و اندازه‌گذاری صحیح اجزاء کلیدی نقشی اساسی در تحقق الزامات عملکردی و قابلیت اطمینان عملیاتی ایفا می‌کند. این فرایند بر پایه محاسبات آنالیز نیرو، تحلیل چرخه‌های رانندگی، و اهداف بهینه‌سازی انرژی انجام شده است. انتخاب مؤلفه‌ها به‌گونه‌ای صورت گرفته که پاسخ‌گوی بارهای گذرا، تغییرات ناگهانی در توان، و نیازهای خاص عملیات خارج جاده‌ای باشند:

- موتور احتراق داخلی

موتور احتراق داخلی به‌عنوان منبع اصلی انرژی در وضعیت‌های با بار بالا، همچون عبور از شیب‌های تند یا رسیدن به سرعت‌های بالا، انتخاب و پیکربندی شده است. معیارهایی مانند قدرت خروجی، منحنی گشتاور-سرعت، بازدهی حرارتی و قابلیت اطمینان در شرایط عملیاتی سخت در انتخاب موتور موردتوجه قرار گرفتند. همچنین، عملکرد آن با استراتژی کنترل هماهنگ شده است تا در نواحی بازدهی بهینه[1] عمل کند.

- موتور الکتریکی

موتور الکتریکی برای عملکرد در سرعت‌های پایین، شرایط حرکت آرام (Stealth Mode) و پشتیبانی از شتاب‌گیری‌های اولیه انتخاب شده است. اندازه‌گذاری آن به‌گونه‌ای صورت‌گرفته تا بتواند در سناریوهای تمام برقی (Pure Electric Mode) و ترمز احیاکننده نقش مؤثری ایفا نماید. همچنین گشتاور خروجی آن به‌گونه‌ای انتخاب‌شده که بتواند به‌تنهایی نیروی لازم برای حرکت اولیه در زمین‌های ناهموار را فراهم کند.

[1] Optimal Operating Line

- باتری

سیستم ذخیره‌سازی انرژی اولیه از نوع باتری لیتیوم-یونی انتخاب شده است که ظرفیت آن برای تأمین برد عملیاتی موردنیاز در حالت الکتریکی (Silent Mobility) طراحی شده است. بازه عملکردی SOC بین ۲۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شده تا از افت ولتاژ شدید و کاهش عمر مؤثر باتری جلوگیری شود. بااین‌حال، در چرخه‌های رانندگی پرفشار و نوسانی، مانند عبور از شیب‌های ناگهانی یا شتاب‌گیری‌های لحظه‌ای، پاسخ‌دهی سریع به تقاضای توان تنها توسط باتری امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو، استفاده ترکیبی از ابرخازن به‌عنوان پشتیبان توان پیک، سبب بهبود پایداری عملکرد، کاهش نرخ تخلیه سریع باتری، و افزایش طول عمر مؤثر آن می‌شود [۱۵]. ابرخازن‌ها به دلیل توانایی شارژ و دشارژ سریع، برای پاسخ‌دهی به توان‌های لحظه‌ای بالا طراحی شده‌اند. در این سیستم، ابرخازن نقش «ضربه‌گیر انرژی» را ایفا می‌کند که بارگذاری ناگهانی موتور الکتریکی را از روی باتری برداشته و موجب می‌شود که چرخه‌های کاری باتری یکنواخت‌تر و پایدارتر شوند. این امر نه‌تنها راندمان حرکتی خودرو را افزایش می‌دهد، بلکه از جنبه اقتصادی و تعمیرات نیز حائز اهمیت است [۱۶].

- سیستم انتقال قدرت

برای انطباق با سناریوهای متنوع عملیاتی، دو گزینه برای سیستم انتقال قدرت مورد بررسی قرار گرفت:

- گیربکس دوسرعته[1]:

این نوع سیستم شامل دو نسبت چرخ‌دنده متفاوت است که یک جفت چرخ‌دنده با نسبت دنده بالا برای شرایط گشتاور بالا مانند شروع حرکت یا عبور از شیب و یک جفت چرخ‌دنده با نسبت دنده پایین برای رانندگی با سرعت‌های بالاتر و مصرف انرژی کمتر مورداستفاده قرار می‌گیرد. این نوع سیستم بیشتر در خودروهای الکتریکی وجود دارد. سادگی ساختار، کاهش وزن، و سهولت در کنترل از مزایای اصلی این پیکربندی است. بااین‌حال، در شرایطی که تنوع بیشتری در سرعت و گشتاور نیاز باشد، انعطاف‌پذیری آن محدود است [۱۷].

- گیربکس چندسرعته[2]:

این سیستم می‌تواند شامل ۴ تا ۸ یا حتی بیشتر نسبت دنده مختلف باشد (مانند گیربکس ۶ یا ۷سرعته). هر دنده برای یک بازه خاص از گشتاور و سرعت طراحی شده است. مزیت اصلی این ساختار، پوشش پیوسته و دقیق‌تر دامنه عملکرد موتور است که به موتور احتراقی و الکتریکی اجازه می‌دهد در نواحی بازدهی بالا کار کنند. در نتیجه، این سیستم منجر به بهبود مصرف سوخت، کاهش فشار روی باتری و افزایش کارآیی کل سیستم می‌گردد.

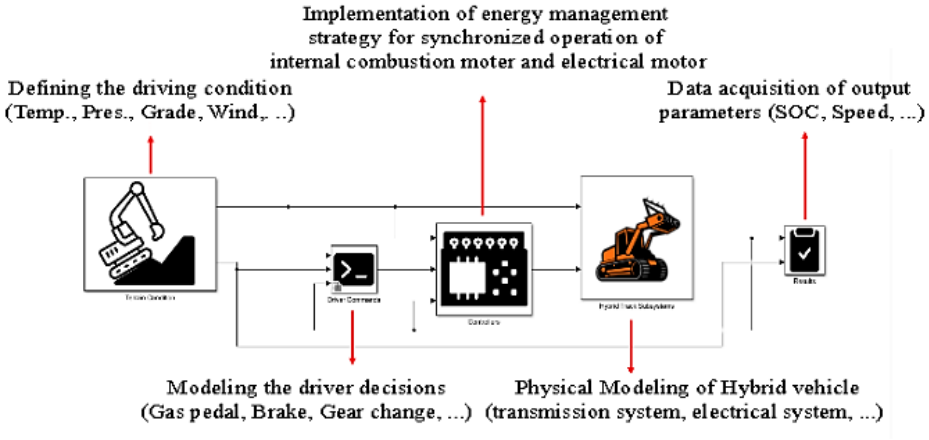
البته این سیستم پیچیده‌تر است و نیاز به کنترل دقیق‌تری دارد، ولی در خودروهای سنگین و شنی‌دار که با دامنه وسیعی از شرایط جاده‌ای مواجه هستند، گیربکس چندسرعته انتخاب غالب در صنعت محسوب می‌شود، زیرا تطبیق‌پذیری بالایی با تغییرات ناگهانی مسیر، شیب و بار خودرو دارد [۱۸، ۱۹].

۳-٤- پیاده‌سازی در نرم‌افزار

شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری کلیدی در مدل‌سازی، توسعه و بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده، به‌ویژه در حوزه وسایل نقلیه هیبریدی، نقش بی‌بدیلی دارد. شبیه‌سازی پیش از ساخت فیزیکی سیستم، امکان ارزیابی عملکرد، تحلیل حساسیت، پیش‌بینی رفتار اجزا، و بهینه‌سازی استراتژی‌های کنترلی را با صرف زمان و هزینه بسیار کمتر فراهم می‌سازد. در این راستا، محیط MATLAB/Simulink به‌عنوان بستر اصلی شبیه‌سازی انتخاب گردید. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از قابلیت‌های گرافیکی و ماژولار خود، امکان مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی پیچیده را در قالب بلوک‌های استاندارد فراهم می‌آورد. استفاده از کتابخانه Simscape در این مقاله، شبیه‌سازی واقع‌گرایانه اجزای مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مانند موتور احتراق داخلی، موتور الکتریکی، گیربکس،

[1] Two-Speed Gearbox
[2] Multi-Speed Transmission

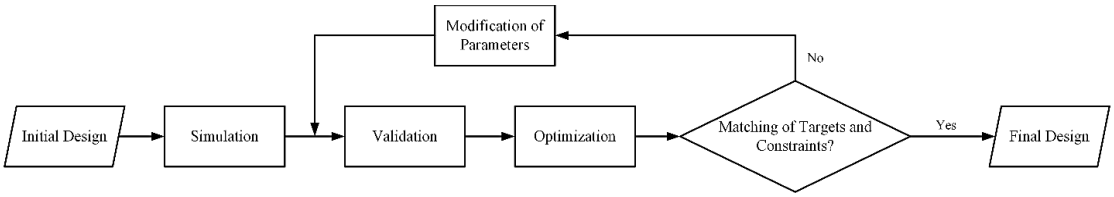
باتری و ابرخازن را ممکن ساخته است. از سوی دیگر، قابلیت تعریف نگاشت‌های بازدهی و استفاده از داده‌های تجربی، دقت مدل‌سازی را به سطح صنعتی ارتقا می‌دهد. شکل ۶ مدل شبیه‌سازی‌شده در محیط MATLAB/Simulink را نشان می‌دهد.



شکل ۶ مدل شبیه‌سازی خودروی شنی‌دار هیبریدی در محیط MATLAB/Simulink

۳-۵- ارزیابی مقایسه‌ای و بهینه‌سازی

فرایند ارزیابی مقایسه‌ای و بهینه‌سازی، یکی از ارکان اصلی در طراحی سیستم‌های پیچیده‌ای نظیر خودروی هیبریدی شنی‌دار به شمار می‌رود. اهمیت این بخش ازآن‌جهت است که طراحی اولیه، هر چند مبتنی بر فرضیات مهندسی و الزامات مأموریتی است، ممکن است در شرایط واقعی یا شبیه‌سازی‌شده نتواند به سطوح مطلوبی از کارآیی دست یابد. ازاین‌رو، لازم است پیکربندی‌های مختلف سیستم، با رویکردی مقایسه‌ای و بر پایه تحلیل داده‌ها، در برابر یکدیگر ارزیابی شوند. ارزیابی مقایسه‌ای امکان شناسایی نقاط ضعف و قوت هر پیکربندی را فراهم کرده و به طراح اجازه می‌دهد تا تصمیمات آگاهانه‌تری در زمینه انتخاب معماری، تنظیم استراتژی‌های کنترلی و تخصیص منابع اتخاذ نماید. این فرایند به‌طور مستقیم منجر به بهینه‌سازی سیستم می‌شود، چراکه بر اساس خروجی‌های شبیه‌سازی (نظیر پایداری وضعیت شارژ، مصرف سوخت، یا عملکرد دینامیکی)، ساختارهایی که کارآیی پایین‌تری دارند، حذف یا بازطراحی شده و تنها گزینه‌های مؤثر باقی می‌مانند. درصورتی‌که نتایج حاصل از یک پیکربندی با انتظارات اولیه یا اهداف طراحی هم‌راستا نباشد، این بخش به‌عنوان مکانیسم بازخورد عمل کرده و فرایند طراحی را مجدداً به مراحل قبلی مانند بازبینی اندازه‌گذاری اجزاء، اصلاح استراتژی کنترلی، یا حتی انتخاب مجدد معماری بازمی‌گرداند. این رویکرد تکرارشونده، تضمین می‌کند که طراحی نهایی نه‌تنها از منظر تئوری بلکه در شرایط شبیه‌سازی‌شده مأموریتی نیز عملکرد مطلوبی ارائه دهد. شکل ۷ روند طراحی و اصلاحات لازم جهت دست‌یابی به اهداف بهینه در فاز طراحی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ دیاگرام ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم مدل‌سازی

تمامی فرایندهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و در محیط شبیه‌سازی Simulink انجام‌گرفته است. مدل طراحی‌شده طی مراحل متعددی مورد ارزیابی سیستماتیک قرار گرفته است که عبارت‌اند از:

۱. اعتبارسنجی مدل

۲. تحلیل مقایسه‌ای بین پیکربندی‌های مختلف سیستم محرکه هیبریدی

۳. ارزیابی عملکرد سیستم با ادغام واحد ذخیره‌ساز انرژی از نوع ابرخازن

۴. فرایند بهینه‌سازی سیستم انتقال قدرت

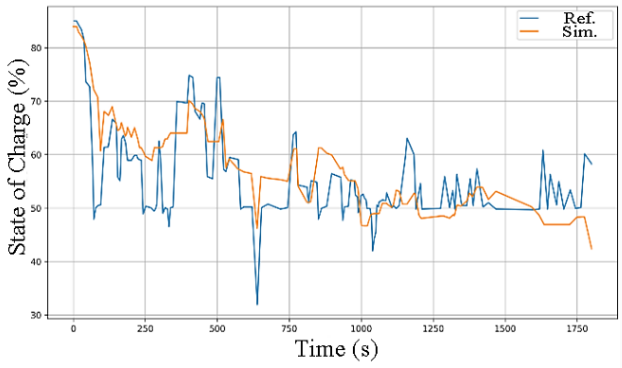
به‌منظور حفظ یکپارچگی نتایج و اطمینان از قابلیت اعتماد مقایسه‌های انجام‌شده، کلیه شبیه‌سازی‌ها تحت شرایط یکسان و با اعمال سیکل‌های حرکتی کاملاً مشابه اجرا گردیده‌اند. این رویکرد، امکان استخراج نتایج عینی و انجام تحلیل‌های کمّی دقیق را فراهم نموده است. نتایج مربوط به هر یک از مراحل بالا در بخش بعد ارائه می‌شود.

٤- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

این بخش به تشریح یافته‌های کلیدی حاصل از پژوهش شبیه‌سازی‌شده در حوزه مدیریت انرژی و ارزیابی عملکرد خودروی شنی‌دار هیبریدی-الکتریکی می‌پردازد.

٤-١- اعتبار سنجی مدل

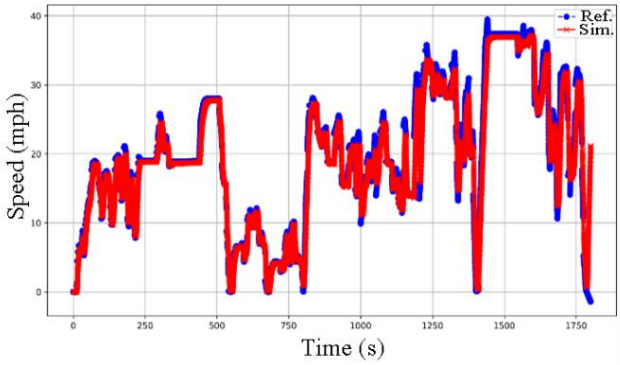
به‌منظور تأیید دقت مدل توسعه‌یافته، سیکل حرکتی و پارامترهای خودروی مشابه با اطلاعات مرجع [۱] اعمال گردید. معیار اصلی اعتبارسنجی، رفتار وضعیت شارژ (SOC) سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری در طول سیکل حرکتی مقاله مرجع [۱] انتخاب‌شده است. شکل ۸ مقایسه وضعیت شارژ باتری در مدل توسعه‌یافته در سیمولینک و مرجع مقایسه‌ای را نشان می‌دهد. در مرجع [۱] از نرم‌افزار AVL Cruise برای کنترل نحوه عملکرد استفاده شده است. مقایسه پروفایل SOC حاصل از شبیه‌سازی با نتایج منتشرشده در مقاله مرجع، نشان‌دهنده انحراف ۸ درصدی است که با توجه به تفاوت‌های احتمالی در مدل شبیه‌سازی نرم‌افزار AVL Cruise، روش‌های حل‌کننده و استراتژی‌های کنترلی، مقدار قابل قبولی محسوب می‌شود. این حاشیه خطا تأیید می‌کند که مدل پیشنهادی به‌صورت معقولانه‌ای رفتار یک خودروی هیبریدی-الکتریکی شنی‌دار را بازتولید کرده و برای تحلیل‌های بعدی مناسب است.



شکل ۸ اعتبار سنجی مدل توسعه داده شده در سیمولینک با اطلاعات مرجع [۱]

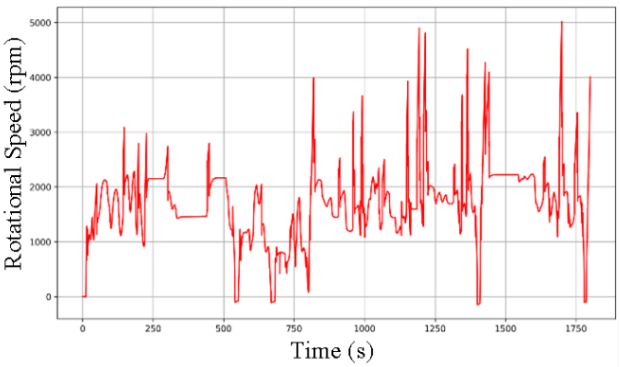
در ابتدا برای بررسی صحت عملکرد الگوریتم کنترلی توسعه‌یافته، نمودار «ردیابی سرعت» رسم شده است. این نمودار (شکل ۹)، تطابق بین سرعت هدف چرخه رانندگی و سرعت واقعی حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مطابقت نزدیک این دو منحنی بیانگر دقت بالای مدل دینامیکی مورداستفاده در شبیه‌سازی و از آن مهم‌تر، اثربخشی قابل‌توجه استراتژی کنترلی در اعمال دقیق فرامین کنترلی به سیستم پیشرانه است. این ردیابی دقیق سرعت هدف، نقش حیاتی در تضمین عملکرد پایدار و ایمن خودرو ایفا می‌کند و همچنین مبنایی برای عملکرد صحیح سیستم‌های پیشرفته کمک راننده فراهم می‌آورد. عملکرد موفق الگوریتم در پاسخ‌دهی به تغییرات بار و شرایط مسیر مختلف، نشان‌دهنده صحت و قابلیت اطمینان آن در سناریوهای رانندگی

گوناگون است.



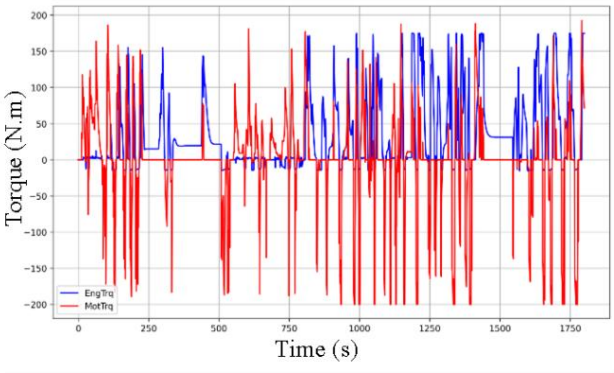
شکل ۹ نمودار ردیابی سرعت (هدف و واقعی)

شکل ۱۰ تغییرات سرعت موتور الکتریکی را در زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. این تغییرات سرعت، پاسخی مستقیم به درخواست توان لحظه‌ای سیستم در حالات مختلف رانندگی از جمله شتاب‌گیری (افزایش سریع سرعت)، کروز (حفظ سرعت ثابت) و ترمز احیاکننده (کاهش سرعت) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان شتاب‌گیری، سرعت موتور به‌سرعت افزایش می‌یابد تا گشتاور موردنیاز برای افزایش سرعت خودرو را تأمین کند. در حالت کروز، سرعت موتور در یک محدوده نسبتاً پایدار حفظ می‌شود که احتمالاً نشان‌دهنده ناحیه عملکردی بهینه با بازدهی بالا است. در مقابل، در هنگام ترمز احیاکننده، سرعت موتور به‌تدریج کاهش می‌یابد زیرا در این حالت، موتور به‌عنوان ژنراتور عمل کرده و انرژی جنبشی را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. شناسایی و تحلیل این نواحی عملکردی بهینه در بازه‌های مختلف سرعت، برای درک چگونگی عملکرد موتور در شرایط گوناگون و بهینه‌سازی عملکرد کلی سیستم پیشرانه بسیار حائز اهمیت است.



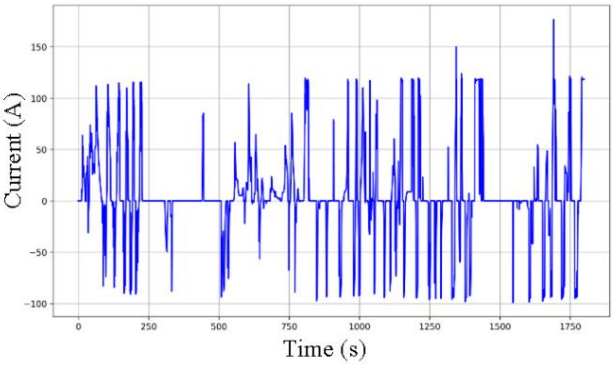
شکل ۱۰ نمودار سرعت موتور الکتریکی

در شکل ۱۱ نحوه توزیع گشتاور بین موتور احتراقی و موتور الکتریکی در طول زمان نمایش داده شده است. در شرایط شتاب‌گیری اولیه و سرعت‌های پایین، موتور الکتریکی با گشتاور فوری خود، بیشترین سهم را در تأمین نیروی پیشران دارد که منجر به شتاب‌گیری نرم و کارآمد می‌شود. با افزایش بار یا رسیدن به شرایط عملکرد بهینه برای موتور احتراقی، این موتور به‌تدریج وارد مدار شده و گشتاور موردنیاز را تأمین می‌کند. این هماهنگی هوشمندانه بین دو موتور، ضمن ارائه عملکرد مطلوب در شرایط مختلف، به بهبود بازدهی سوخت نیز کمک می‌کند. همچنین در حالت ترمز احیاکننده، گشتاور منفی موتور الکتریکی به‌منظور شارژ باتری مشهود است که نه‌تنها انرژی ترمز را بازیابی می‌کند بلکه فشار بر سیستم ترمز مکانیکی را نیز کاهش می‌دهد. این عملکرد نشان‌دهنده مدیریت هوشمندانه توان در سیستم پیشرانه هیبریدی است که با بهره‌گیری از مزایای هر دو نوع موتور، عملکرد بهینه و مصرف سوخت کمتری را به ارمغان می‌آورد.



شکل ۱۱ نمودار گشتاور موتور احتراقی و موتور الکتریکی

در شکل ۱۲ تغییرات جریان باتری را در سناریو رانندگی تعریف‌شده نمایش می‌دهد. مقادیر مثبت بیانگر مصرف توان (تخلیه) و مقادیر منفی نشان‌دهنده شارژ باتری از طریق ترمز احیاکننده است. نوسانات جریان مثبت نشان‌دهنده تطابق لحظه‌ای توان خروجی باتری با نیاز موتور در شرایط مختلف رانندگی است؛ برای مثال، افزایش ناگهانی جریان مثبت در زمان شتاب‌گیری قوی مشهود است. در مقابل، جریان منفی نشان‌دهنده بازگشت انرژی به باتری در هنگام کاهش سرعت یا ترمزگیری است که به بهبود بازدهی کلی سیستم کمک می‌کند. تداوم چرخه‌های شارژ و تخلیه با دامنه مناسب، نشان از مدیریت انرژی مؤثر در سیستم دارد و بیانگر استفاده بهینه از ظرفیت باتری در طول رانندگی است.

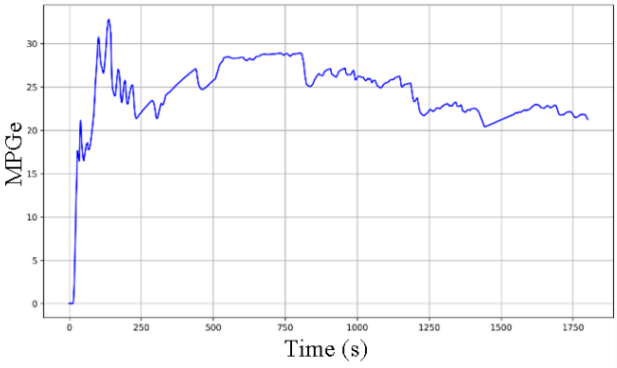


شکل ۱۲ نمودار تغییرات جریان باتری

شکل ۱۳، شاخص مصرف سوخت خودرو الکتریکی که اغلب گالن بنزین معادل در هر مایل[1] می‌باشد، را به‌عنوان یک معیار استاندارد بین‌المللی برای ارزیابی بهره‌وری انرژی در سیستم‌های هیبریدی الکتریکی نمایش می‌دهد. این شاخص که توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست[2] معرفی‌شده، نشان می‌دهد یک خودروی هیبریدی یا الکتریکی چه مسافتی را با مقدار انرژی معادل یک گالن بنزین (تقریباً معادل ۳۳.۷ کیلووات‌ساعت برق) طی می‌کند. MPGe معیاری ترکیبی است که مصرف انرژی از هر دو منبع برق و سوخت فسیلی را در خودروهای هیبریدی در نظر می‌گیرد [۲۰]. در این مقاله، این شاخص به‌عنوان معیاری کلیدی برای مقایسه عملکرد انرژی معماری‌های مختلف سیستم محرکه مورداستفاده قرار گرفته است. افزایش مقدار MPGe به‌طور مستقیم نشان‌دهنده بهبود بازدهی سیستم مدیریت انرژی، کارکرد بهینه موتور احتراقی و افزایش بهره‌وری در مصرف توان الکتریکی است. بااین‌حال، باید توجه داشت که مقدار MPGe صرفاً بیانگر مصرف انرژی است و تضمینی برای افزایش بُرد کلی خودرو نیست؛ زیرا بُرد نهایی به ظرفیت باتری و استراتژی‌های کنترلی وابسته است. به‌صورت کلی، MPGe بالاتر به معنای مصرف بهینه‌تر انرژی و

[1] Miles per gallon gasoline equivalent (MPGe)
[2] Environmental Protection Agency (EPA)

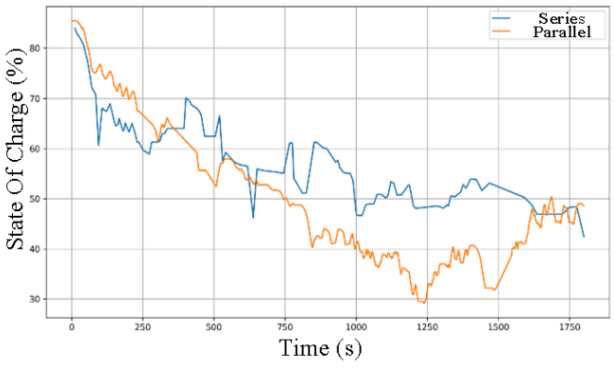
کاهش آلایندگی زیست‌محیطی بوده و هدف مهمی در بهینه‌سازی سامانه‌های پیشرانه هیبریدی برای خودروهای شنی‌دار محسوب می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار MPGe خودروی شنی‌دار سری هیبریدی

٤-۲- مقایسه پیکربندی هیبریدی سری و موازی

پس از تکمیل فرایند اعتبارسنجی مدل و تحلیل نتایج خودروی شنی‌دار هیبریدی سری، مطالعه شبیه‌سازی مقایسه‌ای بین معماری‌های هیبریدی سری و موازی تحت شرایط یکسان انجام شد. شکل ۱۴ منحنی‌های وضعیت شارژ (SOC) هر دو پیکربندی سری و موازی به‌منظور ارزیابی الگوهای مصرف انرژی و بازدهی بازیابی انرژی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی سری، وضعیت شارژ پایدارتر و بالاتری را حفظ می‌نماید که حاکی از بازدهی بهتر در بازیابی انرژی (به دلیل درگیری دائمی موتور الکتریکی با چرخ‌ها در هنگام ترمزگیری) و بهره‌برداری کارآمدتر از سیستم محرکه الکتریکی در شرایط مختلف است. در شاخص پایداری وضعیت شارژ (SOC)، معماری سری بهبود حدود ۱۸ درصدی را نسبت به پیکربندی موازی نشان می‌دهد. این مزیت به‌ویژه در شرایط حرکت‌های توقف-استارت و سرعت‌های پایین که در شرایط سخت‌تر متداول است (جایی که موتور الکتریکی به‌تنهایی یا با بار کم کار می‌کند و موتور احتراقی در بازدهی بهینه شارژ می‌کند)، مشهودتر می‌باشد. در مقابل، پیکربندی موازی تخلیه شارژ سریع‌تری از باتری را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از استفاده هم‌زمان موتور الکتریکی و احتراقی برای تأمین نیرو یا بازدهی کمتر در بازیابی انرژی در برخی حالات عملکردی باشد.

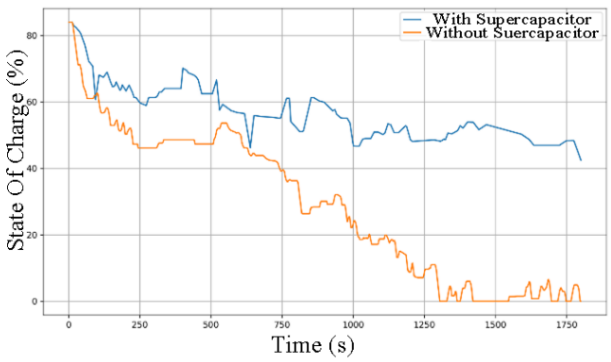


شکل ۱۴ مقایسه وضعیت شارژ برای پیکربندی سری و موازی

به همین دلیل است که در حوزه شبیه‌سازی خودروهای سنگین هیبریدی، معماری سری به‌عنوان پیکربندی غالب در اکثر مقالات مورد بررسی قرار گرفته است. پایداری بالاتر وضعیت شارژ در معماری سری می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش طول عمر باتری در این نوع خودروها شود.

٤-۳- تأثیر ادغام ابرخازن

به‌منظور ارزیابی تأثیر ادغام ابرخازن، دو مدل – یکی با ابرخازن و دیگری بدون آن – تحت شرایط رانندگی یکسان شبیه‌سازی شدند. افزودن ابرخازن به طور چشمگیری قابلیت مقاومت توان اوج را بهبود می‌بخشد که این امر منجر به کاهش فشار بر باتری در طول شتاب‌گیری‌های بالا در شیب‌های تند می‌شود. در این مدل از یک ابرخازن با حداکثر توان ۲۸۰ کیلووات، ولتاژ نامی ۲۵۰ ولت و ظرفیت انرژی ۰/۲۷ کیلووات‌ساعت استفاده شده است.



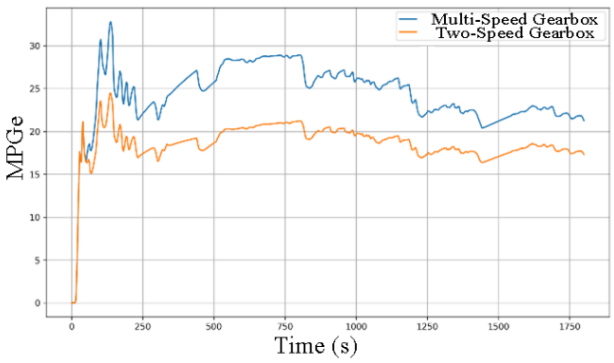
شکل ۱۵ مقایسه وضعیت شارژ برای پیکربندی با و بدون ابرخازن

همان‌طور که در نمودار مقایسه وضعیت شارژ (SOC) مشهود است، مدلی که از ابرخازن بهره می‌برد، تغییرات هموارتری در وضعیت شارژ و عمق تخلیه به‌مراتب کمتری را تجربه می‌کند. در مقابل، مدلی که فاقد ابرخازن است، به‌سرعت با افت شدید وضعیت شارژ مواجه شده و باتری در مدت‌زمان کوتاه‌تری به وضعیت تخلیه کامل می‌رسد. از سوی دیگر، افزودن ابرخازن به سیستم ذخیره‌سازی انرژی منجر به کاهش عمق تخلیه باتری تا حدود ۱۵ درصد، هموارسازی نوسانات SOC تا ۲۲٪ نسبت به حالت بدون ابرخازن، و افزایش حدود ۴.۵ دقیقه‌ای در مدت‌زمان حرکت در حالت الکتریکی خالص شد. این امر به‌وضوح نشان‌دهنده نقش حیاتی ابرخازن در حفظ پایداری وضعیت شارژ باتری، افزایش طول عمر آن و بهبود عملکرد کلی سیستم، به‌ویژه در شرایط پرچالش مانند سیکل‌های رانندگی با شیب‌های شدید می‌باشد. این مزایا در شرایط عملیاتی سخت مانند شتاب‌گیری‌های ناگهانی یا عبور از شیب‌های تند نقش بسیار مؤثری در حفظ عملکرد سیستم ایفا می‌کنند و از تخلیه زودهنگام باتری جلوگیری می‌نمایند که این امر اهمیت دوچندانی دارد. افزایش اختلاف وضعیت شارژ (SOC) و تشدید نوسانات در زمان‌های بالاتر از ۱۰۰ ثانیه ناشی از اثر تجمعی استراتژی مدیریت انرژی و تفاوت پاسخ دینامیکی باتری و ابرخازن می‌باشد. در پیکربندی مجهز به ابرخازن، پیک‌های توان گذرا عمدتاً توسط ابرخازن جذب یا تأمین شده و باتری در معرض بارهای ملایم‌تری قرار می‌گیرد، درحالی‌که در ساختار بدون ابرخازن، باتری مستقیماً مسئول پاسخ‌گویی به تغییرات سریع بار بوده که منجر به نوسانات شدیدتر SOC در بازه‌های زمانی طولانی می‌شود.

٤-٤- تحلیل پیکربندی سیستم انتقال قدرت: مقایسه سیستم گیربکس دوسرعته و چندسرعته

در این بخش، عملکرد سیستم‌های انتقال قدرت دوسرعته و چندسرعته به‌منظور تعیین تأثیر آنها بر مصرف انرژی و بازدهی سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی منحنی‌های وضعیت شارژ (SOC) بین دو پیکربندی متفاوت گیربکس تفاوت‌های ناچیز را نشان داد که حاکی از ثبات الگوی مصرف باتری صرف‌نظر از میزان پیچیدگی محدوده دنده‌ها می‌باشد. بااین‌حال، نتایج شاخص اقتصاد سوخت (MPGe) تفاوت‌های اساسی را آشکار می‌سازد. شکل ۱۶ به مقایسه وضعیت شاخص مصرف سوخت معادل برای دو گیربکس دوسرعته و چندسرعته پرداخته است. در سیستم انتقال قدرت چندسرعته امکان کنترل دقیق‌تر، تطابق بهتر میان گشتاور و سرعت را فراهم نموده و در نتیجه بازدهی انتقال انرژی را هم از موتور احتراق داخلی و هم از موتورهای الکتریکی بهبود می‌بخشد. این امر منجر به بهبود قابل‌اندازه‌گیری در شاخص MPGe هنگام استفاده از سیستم چندسرعته گردیده است،

مزیتی که این پیکربندی را برای مأموریت‌های طولانی‌مدت و در شرایط زمین‌های متنوع مناسب‌تر می‌سازد. نزدیک شدن مقادیر MPGeدر زمان‌های طولانی‌تر ناشی از پایدار شدن شرایط کاری سیستم بوده و به معنای حذف مزیت گیربکس چندسرعته نیست، بلکه بیانگر کاهش نقش شرایط گذرا در بازده کلی سیستم می‌باشد.



شکل ۱۶ مقایسه شاخص اقتصاد سوخت (MPGe) – سیستم انتقال قدرت دوسرعته در مقابل چندسرعته

شایان‌ذکر است که اکثر خودروهای شنی‌دار صنعتی نیز به‌طور گسترده از سیستم‌های انتقال قدرت چندسرعته بهره می‌برند. دلیل اصلی این امر، توانایی این نوع گیربکس‌ها در ارائه عملکرد بهینه در شرایط کاری متنوع و اغلب دشوار این خودروها است. وجود دنده‌های متعدد امکان انتخاب نسبت دنده مناسب با توجه به شیب زمین، نوع بار و سرعت موردنظر را فراهم می‌کند. به‌ویژه در مواجهه با شیب‌های تند، گیربکس چندسرعته این امکان را می‌دهد که موتور در محدوده دورانی بهینه خود کار کند و گشتاور کافی برای غلبه بر نیروی جاذبه و حفظ سرعت را تولید نماید. این امر نه‌تنها از فشار بیش‌ازحد بر موتور جلوگیری می‌کند، بلکه به بهبود راندمان سوخت و افزایش طول عمر قطعات نیز کمک می‌کند. همچنین، در ارزیابی سیستم انتقال قدرت، شاخص MPGe نشان داد که استفاده از گیربکس چندسرعته در مقایسه با سیستم دوسرعته منجر به بهبود ۲۰ درصدی در مصرف بهینه انرژی می‌گردد. این بهبود به‌ویژه در سناریوهایی با نیاز به تطبیق دقیق گشتاور و سرعت در زمین‌های متنوع مشهود است و با رویه‌های صنعتی رایج در بهره‌گیری خودروهای شنی‌دار پیشرفته از سیستم‌های انتقال قدرت چندسرعته همخوانی دارد. به همین دلایل، استفاده از گیربکس‌های چندسرعته یک استاندارد رایج در طراحی خودروهای شنی‌دار صنعتی به شمار می‌رود.

بااین‌حال، لازم به ذکر است که انتخاب نوع سیستم انتقال قدرت (دوسرعته یا چندسرعته) به طور قابل‌توجهی به نوع کاربری و الزامات عملکردی خاص خودروی شنی‌دار بستگی دارد. درصورتی‌که خودرو به‌طورمعمول در زمین‌های سخت با شیب‌های تند و نیاز به گشتاور بالا برای حفظ حرکت عمل کند، استفاده از گیربکس چندسرعته یک ضرورت محسوب می‌شود. این امر امکان انتخاب دقیق دنده و حفظ عملکرد بهینه موتور در شرایط دشوار را فراهم می‌آورد. در مقابل، اگر کاربرد خودرو بیشتر در زمین‌های هموار و با نیاز به تغییرات سرعت محدود باشد، استفاده از گیربکس دوسرعته می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده‌تر و احتمالاً با هزینه کمتر، کافی و مناسب باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب طراحی و مدل‌سازی برای ارزیابی و بهینه‌سازی معماری‌های مختلف سیستم‌های پیشرانه هیبریدی در خودروهای شنی‌دار ارائه و پیاده‌سازی گردید. پس از بررسی پیکربندی‌های رایج در صنعت خودروهای هیبریدی و شناسایی نیازهای خاص عملیاتی این نوع خودروها، معماری‌های سری و موازی شبیه‌سازی شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB/Simulink تحت سیکل رانندگی ویژه و ثابت، تحلیل و مقایسه گردیدند.

مدل توسعه‌یافته ابتدا با مقاله مرجع اعتبارسنجی شد و اختلاف تنها ۸ الی ۹ درصدی در پروفایل SOC نشان‌دهنده صحت مدل در بازتولید رفتار واقعی یک خودروی شنی‌دار هیبریدی-الکتریکی است. در مقایسه معماری‌ها، پیکربندی سری عملکرد

بهتری نسبت به معماری موازی از خود نشان داد؛ به‌طوری‌که در شاخص پایداری وضعیت شارژ (SOC)، بهبود حدود ۱۸ درصدی مشاهده شد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود پیکربندی سری برای کاربردهایی که نیاز به تحرک بی‌صدا و استقامت عملیاتی طولانی‌تر دارند، گزینه‌ای مناسب‌تر تلقی شود.

از سوی دیگر، افزودن ابرخازن به سیستم ذخیره‌سازی انرژی منجر به کاهش عمق تخلیه باتری تا حدود ۱۵ درصد، هموارسازی نوسانات SOC تا ٪۲۲ نسبت به حالت بدون ابرخازن، و افزایش حدود ۴.۵ دقیقه‌ای در مدت‌زمان حرکت در حالت الکتریکی خالص شد. این مزایا در شرایط عملیاتی سخت مانند شتاب‌گیری‌های ناگهانی یا عبور از شیب‌های تند نقش بسیار مؤثری در حفظ عملکرد سیستم ایفا می‌کنند. همچنین، در ارزیابی سیستم انتقال قدرت، شاخص MPGe نشان داد که استفاده از گیربکس چندسرعته در مقایسه با سیستم دوسرعته منجر به بهبود ۲۰ درصدی در مصرف بهینه انرژی می‌گردد. این بهبود به‌ویژه در سناریوهایی با نیاز به تطبیق دقیق گشتاور و سرعت در زمین‌های متنوع مشهود است و با رویه‌های صنعتی رایج در بهره‌گیری خودروهای شنی‌دار پیشرفته از سیستم‌های انتقال قدرت چندسرعته همخوانی دارد.

لازم به ذکر است که تحلیل همزمان معیارهایی نظیر گشتاور خروجی بهینه، مصرف سوخت اقتصادی و توان وزنی سیستم مستلزم تعریف یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه و استراتژی کنترل پیشرفته می‌باشد. ازآنجاکه هدف این پژوهش، ارزیابی تطبیقی معماری‌های مختلف سیستم محرکه هیبریدی تحت سناریوهای عملیاتی مشخص بوده است، چنین تحلیلی در دامنه این مقاله قرار نگرفته و به‌عنوان مسیر پژوهشی آینده پیشنهاد می‌شود.

۶- مراجع

[1] Randive V. Subramanian S. C. Thondiyath A. Design and Analysis of a Hybrid Electric Powertrain for Military Tracked Vehicles, Energy. 2021; 229:120768. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120768

[2] Qin Z. Luo Y. Li K. Peng H. Optimal Design of a Novel Hybrid Electric Powertrain for Tracked Vehicles, Energies. 2017; 10(12), 2141. https://doi.org/10.3390/en10122141

[3] Balamurugan S. Srinivasan R. Tracked Vehicle Performance Evaluation using Multi Body Dynamics, Defence Science Journal. 2017; 67(4): 476-480. https://doi.org/10.14429/dsj.67.11534

[4] Dalsjø P. Hybrid Electric Propulsion for Military Vehicles-Overview and Status of the Technology, (2008).

[5] Jia C. Qiao W. Qu L. Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicles: a Case Study for Agricultural Tractors, in: 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, 2018; 1-6.

[6] Grycan W. Electric Vehicles in Mining for the Aspect of Operational Safety, Prz. Elektrotechniczny. 2022; 110-113.

[7] Masrur M. A. Hybrid and Electric Vehicle (HEV/EV) Technologies for Off-Road Applications, Proceedings of the IEEE. 2020; 109(6): 1077-1093. https://doi.org/10.1109/jproc.2020.3045721

[8] Çeliksöz D. Kılıç V. Series-Hybrid Powertrains: Advancing Mobility Control in Electric Tracked Vehicle Technology, World Electric Vehicle Journal. 2024; 15(2), 47. https://doi.org/10.3390/wevj15020047

[9] Ahmadi S. Bathaee S. Hosseinpour A. H. Improving Fuel Economy and Performance of a Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle (Fuel-Cell, Battery, and Ultra-Capacitor) using Optimized Energy Management Strategy, Energy Conversion and Management. 2018; 160:74-84. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.020

[10] Sims B. Crase S. Review of Battery Technologies for Military Land Vehicles, Land Division, Defence Science and Technology Group, Edinburgh, Australia, 2017.

[11]Akhtarshenas Ghadim O. Hosseini H. Joudaki J. Studying the Effect of Implementing Air Spring on Kinematic Behavior, Stability and Handling of Heavy Vehicles, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2025; 57(6): 729-756 (in Persian). https://doi.org/10.22060/mej.2025.23981.7830.

[12] Giesbrecht J. Feasibility of Hybrid Diesel-Electric Powertrains for Light Tactical vehicles, Defence Research and Development Canada. 2018.

[13] Piancastelli L. Toccaceli M. Sali M. Leon-Cardenas C. Pezzuti E. Electric Hybrid Powertrain for Armored Vehicles, Energies. 2023; 16(6): 2605. https://doi.org/10.3390/en16062605

[14] Randive V. Subramanian S. C. Thondiyath A. Component Sizing of Single and Dual Drive Series Hybrid Electric Powertrain for Military Tracked Vehicles, 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2019; 1-6.

[15] AlKawak O. A. Kumar J. R. R. Daniel S. S. Reddy C. V. K. Hybrid Method Based Energy Management of Electric Vehicles using Battery-Super Capacitor Energy Storage, Journal of Energy Storage. 2024; 77: 109835. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109835

[16] Mohammed A. S. Atnaw S. M. Salau A. O. Eneh J. N. Review of Optimal Sizing and Power Management Strategies for Fuel Cell/Battery/Super Capacitor Hybrid Electric Vehicles, Energy Reports. 2023; 9: 2213-2228. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.042

[17] Laitinen H. Lajunen A. Tammi K. Improving Electric Vehicle Energy Efficiency with Two-Speed Gearbox, 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2017; 1-5.

[18] Ahssan M. R. Ektesabi M. M. Gorji S. A. Electric Vehicle with Multi-Speed Transmission: A Review on Performances and Complexities, SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2018; 7(2): 169-182. https://doi.org/10.4271/08-07-02-0011

[19] Kim D. M. Lee S. G. Kim D.K. Park M. R. Lim M. S. Sizing and Optimization Process of Hybrid Electric Propulsion System for Heavy-Duty Vehicle based on Gaussian Process Modeling Considering Traction Motor Characteristics, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022; 161: 112286. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112286

[20] Boretti A. Electric Vehicles with Small Batteries and High-Efficiency On-Board Electricity Production, Energy Storage. 2019; 1(4): 75. https://doi.org/10.1002/est2.75