



Simulation of fuel consumption of a hydrogen fuel cell electric vehicle with a thermostat control strategy and variables affecting its fuel consumption in ADVISOR software

Saeid Saravani¹, Mohammadreza Arbab Tafti¹, Arash Mohammadi^{1*}, Naser Sina²

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Fuel Cell Electric Vehicles
Hydrogen Fuel Consumption
ADVISOR
Driving Cycle
Road Gradient

ABSTRACT

In recent years, due to the depletion of fossil energy resources and concerns about greenhouse gas emissions, the use of hydrogen and fuel cells (FCs) has received much attention. Therefore, there is interest in establishing hydrogen production infrastructure and developing fuel cell electric vehicles. Fuel cell electric vehicles with high range, short refueling time, and zero emissions, compared to battery electric vehicles, are considered the roadmap of future vehicles. This paper focuses on modeling and fuel consumption of fuel cell electric vehicles (FCEV) using ADVISOR software. The simulation of the fuel cell electric vehicle system with a thermostat control strategy during different driving cycles is carried out. The aim of applying this strategy is to reduce the fuel consumption of fuel cell electric vehicles. The results obtained from the fuel consumption in the three driving cycles Federal Test Procedure (FTP), New European Driving Cycle (NEDC), and Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) are 12.1, 7.1, and 7.6 liters, respectively, which were validated with the fuel consumption results of a prototype vehicle from Argonne National Laboratory (ANL). Then, the parameters affecting hydrogen fuel consumption, such as road gradient and aerodynamic drag coefficient, were also investigated in three different driving cycles: FTP, NEDC, and UDDS. Hydrogen fuel consumption in the FTP driving cycle increased by an average of 24.66% for a one percent increase. In the NEDC driving cycle, this increase in hydrogen fuel consumption is equal to 25.92% on average. Also, in the UDDS driving cycle, the increase in hydrogen fuel consumption for a one percent increase in road gradient is equal to 25.87% on average. The results also show that with an increase in the aerodynamic drag coefficient from 0.26 to 0.30, the average hydrogen fuel consumption per 100 km increased by an average of 2.5%.



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: amohammadi@sru.ac.ir (A. Mohammadi)

Received 5 June 2025; Accepted 9 October 2025

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Saravani S, Arbab Tafti M, Mohammadi A, Sina N. Simulation of fuel consumption of a hydrogen fuel cell electric vehicle with a thermostat control strategy and variables affecting its fuel consumption in ADVISOR software. 2025 Nov 22;72(3):85-105. doi: [10.22034/ER.2025.2062179.1095](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2062179.1095)

شبیه‌سازی مصرف سوخت خودروی برقی پیل سوختی هیدروژنی با راهبرد تنظیم دمابان و متغیرهای موثر بر مصرف سوخت آن در نرم‌افزار آدوایزر

سعید سروانی^۱، محمدرضا ارباب تفتی^۱، آرش محمدی^{۱*}، ناصر سینا^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، به دلیل کاهش منابع انرژی‌های سنگواره‌ای و نگرانی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده هیدروژن و پیل‌های سوختی بسیار توجه شده است. بنابراین، علاقمندی به سمت ایجاد زیرساخت‌های تولید هیدروژن و توسعه خودروی برقی پیل سوختی وجود دارد. خودروهای برقی پیل سوختی با پیمایش بالا، زمان سوخت‌گیری کوتاه و آلاینده‌ی صفر، در مقایسه با خودروهای برقی با انباره، نقشه راه خودروهای آینده محسوب می‌شوند. مقاله حاضر بر شبیه‌سازی و مصرف سوخت خودروهای برقی پیل سوختی با استفاده از نرم‌افزار آدوایزر متمرکز است. شبیه‌سازی سامانه خودرو برقی پیل سوختی با راهبرد تنظیم دمابان در طول چرخه‌های رانندگی مختلف انجام شده است. هدف از به کار بردن این راهبرد، کاهش مصرف سوخت خودرو برقی پیل سوختی است. نتایج بدست آمده از مصرف سوخت در سه چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا (FTP)، چرخه رانندگی جدید اروپا (NEDC) و الگوی رانندگی توان آزما شهری (UDDS) به ترتیب برابر با ۱۲٫۱، ۷٫۱ و ۷٫۶ لیتر است که با نتایج مصرف سوخت یک خودرو نمونه آزمایشگاه ملی آرگون صحت سنجی شد. سپس متغیرهای تأثیرگذار بر مصرف سوخت هیدروژن از قبیل شیب جاده و ضریب درگ هواپوشی نیز در سه چرخه رانندگی مختلف FTP، NEDC و UDDS بررسی شد. مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا به ازای افزایش یک درصدی به طور میانگین ۲۴٫۶۶ درصد افزایش یافته است. در چرخه رانندگی جدید اروپا این افزایش مصرف سوخت هیدروژن به طور میانگین برابر با ۲۵٫۹۲ درصد است. همچنین در الگوی رانندگی توان آزما شهری افزایش مصرف سوخت هیدروژن به ازای افزایش یک درصدی شیب جاده به طور میانگین برابر با ۲۵٫۸۷ درصد است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب پساى هواپوشی از ۰٫۲۶ تا ۰٫۳۰، میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر به طور میانگین تا ۲٫۵ درصد افزایش یافت.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

خودروهای برقی پیل سوختی
مصرف سوخت هیدروژن
نرم‌افزار آدوایزر
چرخه رانندگی
شیب جاده



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: amohammadi@sru.ac.ir (آرش محمدی)

دریافت ۱۵ خرداد ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۷ مهر ۱۴۰۴

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

با گسترش مناطق شهری در سطح جهان، سامانه‌های حمل و نقل معمولی که عمدتاً به موتورهای احتراق داخلی متکی هستند که مقادیر زیادی سوخت‌های سنگواره‌ای نیاز دارند و به‌طور قابل توجهی به تولید آلاینده‌ها و تغییرات اقلیمی منجر می‌شود [۱]. ولی با وجود چالش‌های فراوان افراد بیشتری به دنیایی که انتشار گازهای گلخانه‌ای ندارد، علاقه‌مند می‌شوند و در نتیجه، استفاده از منابع انرژی پاک‌تر برای رشد بلندمدت مهم است. از این رو در صنعت حمل و نقل، که یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی است فناوری‌های گوناگونی برای افزایش بهره‌وری سوخت معرفی شده‌اند و در این میان وسایل نقلیه برقی به گزینه خوبی برای کاهش مصرف به سوخت‌های سنگواره‌ای تبدیل شده‌اند. چنین اقداماتی می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای سطح آلودگی هوا را کاهش دهد و در عین حال به تلاش‌ها برای مبارزه با گرمایش جهانی کمک کند [۲]. به لطف فناوری‌های جدید صرفه‌جویی در انرژی در زمینه خودرو، وسایل نقلیه برقی پیل سوختی به روشی محبوب برای سامانه حمل و نقل تبدیل شده‌اند که به محیط زیست آسیب نمی‌زند [۳].

پیل‌های سوختی دستگاه‌هایی هستند که انرژی الکتروشیمیایی هیدروژن و اکسیژن را به انرژی برقی، آب و گرما تبدیل می‌کنند [۴]. پیل‌های سوختی به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای حمل و نقل خودرو به حساب می‌آیند، با این حال، این فناوری با چالش‌هایی مواجه است که بایستی آن‌ها را مرتفع نمود تا این فناوری همه گیر شود. مطالعات در حال انجام بر درک شرایطی متمرکز است که تحت آن پیل‌های سوختی به بهترین وجه برای برآوردن نیازهای خودرو استفاده می‌شوند، از جمله طول عمر و بازیابی خرابی آن‌ها و همچنین به مواردی مانند شروع به کار سرد افت بازده در چگالی جریان بالایی اشاره کرد [۵]. بازده تبدیل انرژی ترمودینامیکی پیل‌های سوختی به‌طور کلی بالاتر از حد بازده چرخه کارنو موتورهای احتراق داخلی معمولی است، که به این معنی است که وسایل نقلیه پیل سوختی می‌توانند در بهره‌وری انرژی و مصرف سوخت بهتر باشند [۶].

رایج‌ترین انواع فناوری پیل‌های سوختی غشایی تبادل پروتون و پیل‌های سوختی اکسید جامد هستند. پیل‌های سوختی غشایی تبادل پروتون برای خودروها محبوب هستند زیرا توان بالایی تولید می‌کنند، در دمای عملیاتی پایین‌تر کار می‌کنند و در عین حال شروع به کار سریع است و آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند [۷].

پیل‌های اکسید جامد در دماهای بالا کار می‌کنند و کاربرد نیروگاهی دارند و از این رو پیل‌های سوختی غشایی تبادل پروتون به‌عنوان فناوری ترجیحی برای خودرو باقی می‌مانند. با این حال، به دلیل مشکلات شروع به کار و دینامیک کند وسایل نقلیه برقی و دورگه به یک سامانه ذخیره انرژی کمکی (انباره) نیاز دارند [۸].

خودروی برقی پیل سوختی معمولاً دارای یک پشته پیل سوختی، یک مجموعه انباره لیتیومی، یک موتور برقی و سامانه انتقال قدرت است. با توجه به ساختار خودروهای برقی پیل سوختی ایجاد یک برنامه مدیریت انرژی شفاف برای اطمینان از عملکرد خوب سامانه، پایدار ماندن و ایمن بودن آن بسیار مهم است [۹].

به هر حال مهم‌ترین چالش، نبود زیرساخت سوخت هیدروژنی و هزینه بالای تامین و توزیع آن است که یک چالش تجاری راهبردی را برای شرکت‌های خودروسازی ایجاد کرده است. کشورهای مختلف قوانین خاص خود را در مورد سوخت‌های جایگزین برای حمل و نقل دارند. به‌عنوان مثال، کشور ژاپن برنامه‌ای برای گسترش سریع وسایل نقلیه پیل سوختی و ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژنی دارد؛ همچنین این کشور قصد دارد تا سال ۲۰۲۵، ۲ میلیون وسایل نقلیه پیل سوختی داشته باشد و تعداد ایستگاه‌های هیدروژن این کشور در حال حاضر از ۳۲۰ عدد فراتر رفته است [۱۰].

هیدروژن یک منبع انرژی اولیه (مانند نفت) نیست، بلکه یک حامل انرژی (برق) است که می‌تواند از طیف گسترده‌ای از منابع انرژی مانند هیدروکربن‌ها، انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای به‌دست آید. به‌همین دلیل، توجه به این نکته مهم است که یک سامانه محرکه پیل سوختی از منظر مخزن به چرخ بدون کربن است، اما انتشار کربن جهانی آن تابعی از نحوه تولید و توزیع تولید هیدروژن است. هیدروژن می‌تواند از سوخت‌های سنگواره‌ای یا از آب تولید شود. دومی بسیار

تمیزتر اما متأسفانه گران‌تر (تا ده برابر بیشتر از سوخت‌های سنگواره‌ای) است [۱۱].

در این زمینه، شبیه‌سازی مصرف و عملکرد خودروهای پیل سوختی می‌تواند برای خودروسازان و قطعه‌سازان خودرو بسیار مفید باشد تا میزان بلوغ این فناوری را درک کنند و بفهمند که ورود به بازار آن در چه مقطعی امکان‌پذیر است [۱۲]. از این رو، تحقیقات و مطالعات در مورد مصرف سوخت خودروهای پیل سوختی در ادبیات موجود است، اما اکثر مطالعات گزارش شده قبلی عوامل مؤثر بر مصرف سوخت خودروی پیل سوختی مانند شیب جاده و ضریب پسا را در شبیه‌سازی‌ها و تحقیقات خود در نظر نگرفتند، که عامل مهمی برای ارزیابی قابل اعتماد فناوری‌های خودروهای جدید و نوظهور مانند خودروی پیل سوختی است که داده‌های مصرف سوخت دقیقی برای آن‌ها هنوز در دسترس نیست. هرچند که معرفی قوای محرکه دورگه برقی منجر به افزایش بهره‌وری انرژی خودروها شده است و بر اساس گزارش مقالات مختلف توانایی کاهش مصرف سوخت تا ۳۹٫۳ درصد در آزادراه‌ها و ۵۸ درصد در شریان‌های شهری را در مقایسه با خودروی احتراق داخلی دارد [۱۳]، با این حال خودروهای برقی پیل سوختی نیز یکی از راه‌حل‌های نویدبخش در کاهش مصرف سوخت و انرژی خودروها به حساب می‌آید. یوسف ذیب و همکاران یک سامانه پیش‌رانه خودروهای دورگه برقی پیل سوختی را شبیه‌سازی کردند. این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار متلب-آدوایزر برای ساخت الگوهای پیش‌رانه انجام شد که با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. الگو نیرو محرکه خودروی برقی پیل سوختی مصرف سوخت لحظه‌ای را با استفاده از متغیرهای ورودی، مانند سرعت خودرو، شتاب و شیب جاده محاسبه می‌کند [۱۴].

در پژوهشی دیگر، شاهین و همکاران، یک خودروی مسافربری سایز متوسط با پشته پیل سوختی ۸۰ کیلوواتی که توسط یک بسته انباره ۱٫۹۷ کیلووات ساعتی را با استفاده از متلب شبیه‌سازی کرد. این وسیله نقلیه بر اساس چرخه رانندگی جهانی برای خودروهای سبک^۱ شبیه‌سازی شد و مقادیر مصرف سوخت و برد به ترتیب ۲٫۱۵ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر معادل بنزین و ۸۵۹٫۲ کیلومتر به دست آمده است [۱۵].

استفاده از چرخه رانندگی استاندارد شده یکی از روش‌های متداول در ارزیابی مصرف سوخت و انرژی خودروها است. با این حال، چالش اصلی در استخراج چرخه رانندگی، تحلیل داده‌ها به منظور توسعه و تعریف رفتار مناسب خودرو است [۱۶]. نکته دیگر نیز تفاوت بین چرخه رانندگی استاندارد و شرایط واقعی رانندگی است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. باقری و همکاران، مصرف سوخت یک خودرو احتراق داخلی را در چرخه رانندگی واقعی شهر شیراز یکی در روزهای کاری و دیگری در روزهای تعطیل تحلیل کرده‌اند [۱۷].

همچنین در پژوهشی دیگر برای شهر تهران تأثیر متغیرهای ویژگی‌های رانندگی و نوع وسیله نقلیه بر مصرف سوخت و عملکرد انتشار آلاینده‌ها در طول چرخه‌های رانندگی واقعی را بررسی کردند [۱۸].

سینا و همکاران نشان داده‌اند که مصرف انرژی اتوبوس شهری از متغیرهای مختلفی همچون سرعت میانگین، شیب مسیر، بیشینه سرعت و بیشینه شتاب تأثیر می‌پذیرد [۱۹]. همچنین در پژوهشی مشابه که توسط فری و همکاران انجام پذیرفته است، مصرف سوخت اتوبوس‌های پیل سوختی-دیزل و هیدروژن با در نظر گرفتن عوامل کلیدی مانند سرعت، شتاب و شیب جاده محاسبه شده است و نتایج بیانگر آن است که شرایط مختلف رانندگی با شروع/توقف‌های مختلف، شیب‌های مختلف جاده، شتاب/کاهش سرعت متفاوت بر مصرف سوخت خودرو تأثیر می‌گذارد [۲۰].

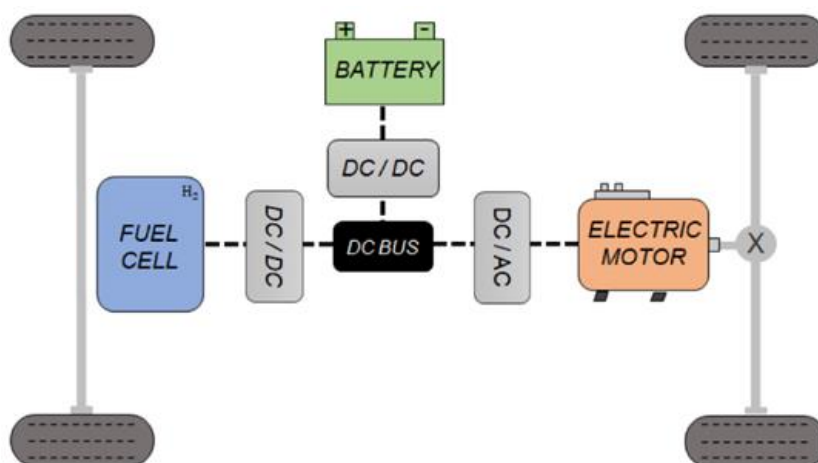
یکی از مزایای مهم شبیه‌سازی در مهندسی، توانایی آن در بررسی عملکرد خودرو، مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه گزینه‌های جدید خودرویی است که به آسانی برای آزمایش در دنیای واقعی در دسترس نیستند. در بیشتر مطالعات قبلی میزان و نحوه تأثیر عوامل مختلف بر مصرف سوخت مانند شیب جاده و ضریب پسا در نظر گرفته نشده است و یا اگر در نظر گرفته شده است به میزان تأثیر دامنه تغییرات نزدیک به شرایط واقعی این عوامل در مصرف سوخت پرداخته نشده است. از این‌رو در مقاله حاضر، یک خودروی سواری با قوای محرکه برقی پیل سوختی هیدروژنی

¹ Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)

به منظور بررسی میزان و نحوه تأثیر تغییر عوامل مختلف بر مصرف سوخت، شبیه‌سازی و صحنه‌گذاری می‌شود. آن چه که این پژوهش را از پژوهش‌های قبلی متمایز می‌کند یک راهبرد تنظیمی نوآورانه برای تنظیم تقاضای برق، حفظ وضعیت بارگیری^۱ انباره در یک دامنه محدود است که مبتنی بر راهبرد تنظیمی دما بان است. پس از به کارگیری این راهبرد تنظیم در خودرو برقی پیل سوختی، تأثیر ویژگی‌های شیب جاده و ضریب پسا هواپوشی بر مصرف سوخت هیدروژن و حساسیت‌سنجی این عوامل بررسی شده است.

۲- شبیه‌سازی خودرو برقی پیل سوختی هیدروژنی

برای شبیه‌سازی خودرو برقی پیل سوختی هیدروژنی از داده‌های نسل اول خودروی پیل سوختی تویوتا میرای در محیط نرم‌افزاری آدوایزر استفاده شد. مطابق شکل ۱، قوای محرکه شامل واحد ذخیره سازی، سامانه پیل سوختی و موتور برقی است و مغز متفکر سامانه نیز تنظیم‌گر مرکزی است. هر جزء از طریق یک معادله دینامیکی شبیه‌سازی می‌شود و در نهایت گشتاور موتور برقی حلقه اتصال قوای محرکه به دینامیک خودرو است.



شکل ۱ طرحواره خودرو پیل سوختی

موتور از طریق نقشه گشتاور-سرعت با منحنی‌های بازده توصیف می‌شود. انباره از طریق متغیرهای اصلی آن مانند وضعیت بارگیری، ظرفیت، ولتاژ و مقاومت داخلی شبیه‌سازی می‌شود. کل سامانه پیل سوختی به عنوان یک تابع واحد از توان خالص خروجی مجموعه انتخاب می‌شود و بنابراین پیچیدگی مجموعه در نظر گرفته نمی‌شود. فقط یک نقشه سامانه که تمام جنبه‌ها را بدون وارد کردن جزئیات مربوط به کمکی‌های مجموعه در نظر می‌گیرد، ارائه شده است. نرم‌افزار آدوایزر فرآیند متغیرسازی الگو را تسهیل می‌کند و امکان تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی جامع را فراهم می‌کند. از این رو، امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج به‌دست‌آمده از مهندسی معکوس در آزمایشگاه ملی آرگون و نتایج شبیه‌سازی دانشگاه پلی‌تکنیک تورین ایتالیا را می‌دهد [۲۱].

۲-۱- شبیه‌سازی متغیرهای شاسی و بار

اجزای اصلی و مشخصات شاسی خودروی برقی پیل سوختی در جدول ۱ قابل مشاهده است. به‌منظور شبیه‌سازی خودروی برقی پیل سوختی دلخواه، این مشخصات در طرح نرم‌افزاری اعمال شد.

¹ Charge

جدول ۱ ویژگی‌های شاسی و بار [۲۱]

ویژگی	مقدار ویژگی
جرم	۱۸۵۰ کیلوگرم
مساحت ناحیه جلویی	۲,۳۳ متر مربع
کسر وزن جلو در هنگام توقف	۰,۵۵
ارتفاع مرکز ثقل	۰,۳۸۵ متر
جرم بار	۱۹۰ کیلوگرم
ابعاد چرخ	۲۱۵/۵۵ R ۱۷
ضریب پسا	۰,۲۹

در جدول ۱ نشان داده شده است جرم خودرو با تجهیزات استاندارد و بدون سرنشین در نظر گرفته شده است همچنین جرم بار شامل دو سرنشین ۷۵ کیلوگرمی به همراه ۴۰ کیلوگرم بار است.

۲-۲- شبیه‌سازی انباره

تویوتا میرای به انباره ۶,۵ آمپرساعت و ۲۴۴,۸ ولت نیکل متال هیدرید مجهز شده است. مشابه‌ترین داده‌های انباره یافت شده مربوط به یک پریوس ۱۹۹۸ است [۲۲]. جدول ۲ برخی از مشخصات اصلی انباره را فهرست می‌کند.

جدول ۲ ویژگی‌های بسته انباره [۲۲]

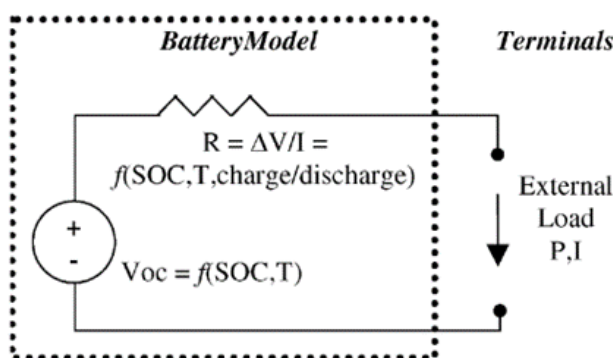
ویژگی	مقدار
تعداد بخش	۳۴
حداقل ولتاژ بخش	۴ ولت
حداکثر ولتاژ بخش	۹,۵ ولت
جرم بخش	۱,۳۷ کیلوگرم
حداکثر ظرفیت انباره	۶,۵ آمپرساعت
بازده کولمبیک	۰,۹

در نرم‌افزار آدوایزر قسمت سامانه ذخیره انرژی^۱ نشان‌دهنده بسته انباره است که انرژی را در خودروی شبیه‌سازی شده ذخیره می‌کند. این قسمت درخواست توان برقی را دریافت و توان خروجی موجود/واقعی را از انباره، ولتاژ و جریان انباره و وضعیت بارگیری انباره^۲ برمی‌گرداند. طبق قرارداد، حالت تخلیه توان مثبت در نظر گرفته می‌شود. چندین الگو سامانه ذخیره انرژی توسعه یافته در نرم‌افزار آدوایزر گنجانده شده است. اولین طرح انباره مقاومت داخلی^۳ که مدار معادل آن در شکل ۲ نشان داده شده است. این الگو در سیمولینک بسیار سریع اجرا می‌شود و نتایج معقولی ارائه می‌دهد که در این شبیه‌سازی از این الگو استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲ توان ارائه شده توسط انباره با توجه به حداقل ولتاژ مورد نیاز آن به حداکثر مقداری که مدار معادل می‌تواند ارائه دهد یا حداکثر مقداری که تنظیم کننده موتور می‌تواند بپذیرد، محدود می‌شود. همه موارد ذکر شده در این بخش در قسمت طرح انباره اجرا شده است.

¹ Energy Storage System Variables (ESS)

² State of Charge

³ Internal Resistance Battery Model



شکل ۲ الگوی انباره مقاومت داخلی

۲-۳- شبیه‌سازی سامانه پیل سوختی

تنها داده‌های موجود برای شبیه‌سازی میرای داده‌های تویوتا و آزمایش‌های مهندسی معکوس آزمایشگاه ملی آرگون بود. منحنی کارایی پشته پیل سوختی ابتدا با داده‌های تجربی آزمایشگاه ملی آرگون پیدا و سپس نمونه برداری نقطه به نقطه بازسازی شد. داده‌های جدول ۳، برای سامانه پیل سوختی تویوتا میرای یافت شده است.

جدول ۳ ویژگی‌های PEMFC [۲۱]

مقدار ویژگی	نام ویژگی
۳۷۰	تعداد پیل
۰٫۶۷ ولت	ولتاژ یک پیل
۱۱۴ کیلو وات	حداکثر توان خروجی پشته
۱٫۹ آمپر بر سانتی‌متر مربع	تبادل چگالی جریان

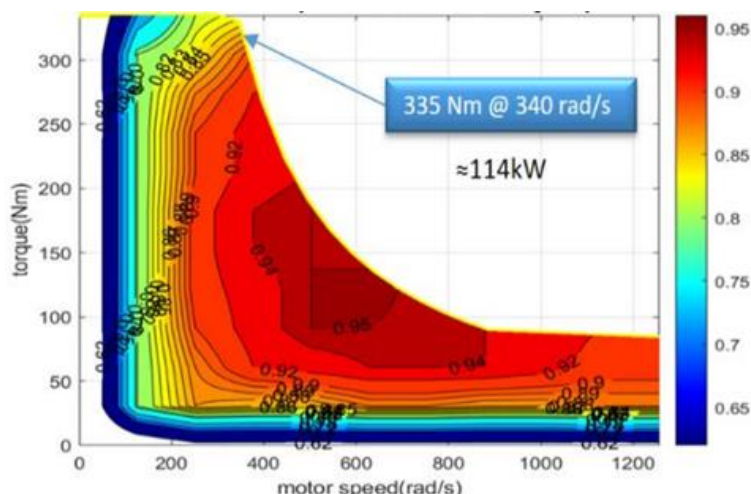
نرم‌افزار آدوایزر شامل دو گزینه شبیه‌سازی سامانه پیل سوختی مبتنی بر تجربی و یک گزینه شبیه‌سازی مشترک است. شبیه‌سازی اول الگو جستجوی توان خالص در مقابل مصرف سوخت^۱ و شبیه‌سازی دوم الگو مبتنی بر منحنی قطبیدگی^۲ است. در این پژوهش از الگو اول استفاده شده است زیرا هدف شبیه‌سازی بررسی مصرف سوخت هیدروژن است. پس از انتخاب الگو پیل سوختی و تعیین ویژگی‌های پیل سوختی مربوط به خودرو مدنظر، الگو سامانه پیل سوختی در نرم‌افزار ایجاد شد.

۲-۴- شبیه‌سازی موتور برقی

موتور برقی تویوتا میرای یک مولد برقی آهنربا دائمی ۱۱۴ کیلو وات جریان متناوب با حداکثر ۳۳۵ نیوتن متر گشتاور است. مشابه‌ترین داده‌های حرکتی یافت شده برای تویوتا پریوس ۲۰۱۰ بود [۲۳]. ویژگی گشتاور-سرعت به‌منظور برآورده کردن حداکثر محدودیت قدرت در سرعت پایه با حداکثر گشتاور داده شده توسط داده‌های شرکت تویوتا (۳۳۵ نیوتن متر) ساخته شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. شبیه‌سازی موتور برقی خودرو مدنظر با استفاده از منحنی حداکثر گشتاور و نقشه بازدهی موتور تنظیم شد تا الگو به بهترین حالت با نمونه واقعی مطابقت داشته باشد.

¹ Net Power vs Fuel Consumption Lookup Model

² Polarization Curve-Based Model



شکل ۳ منحنی حداکثر گشتاور و نقشه بازدهی موتور [۲۱]

۲-۵- راهبرد تنظیم

راهبرد تنظیم استفاده شده در این شبیه‌سازی، یک راهبرد تنظیم نوآورانه بر مبنای راهبرد تنظیم دما بان^۱ است. این راهبرد راهبرد مبتنی بر قانون است که در آن وضعیت روشن/خاموش پیل سوختی توسط محدوده بالا و پایین سطح بارگیری انبار (SOC) تعیین می‌شود. قاعده اصلی این راهبرد این است که پیل سوختی را روشن کرده و آن را در نقطه کارایی بهینه ($P_e = P_{eopt}$) هنگامی که SOC انبار کمتر از حد پایین است، روشن نگه دارد. هنگامی که SOC انبار بالاتر از حد بالا باشد، پیل سوختی خاموش می‌شود. در این راهبرد، انبار به عنوان یک تعادل‌ساز می‌تواند کارایی عملیاتی و صرفه‌جویی در سوخت FC را بهبود بخشد.

توجه به این نکته ضروری است که راهبرد تنظیم دما بان یکی از راهبردهای پایه‌ای در تنظیم قوای محرکه پیل سوختی است. اما از آنجایی که یکی از اهداف مقاله حاضر بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان مصرف سوخت خودرو است، استفاده از راهبردهای مبتنی به بهینه‌سازی نمی‌تواند قابل اتکا باشد. چراکه روش صحیح آن است که پس از تغییر متغیر مورد نظر، راهبرد تنظیم بهینه دوباره برای خودرو با متغیر جدید استحصال گردد و علاوه بر اینکه حجم محاسبات بسیار زیادی را می‌طلبد، فرآیند مقایسه مصرف سوخت با راهبرد تغییر یافته نیز نمی‌تواند معیار صحیحی برای مقایسه باشد.

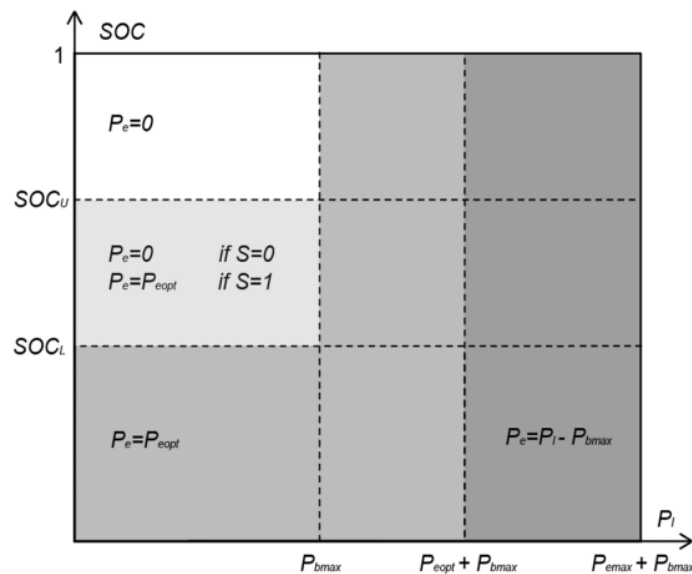
$$S(t) = \begin{cases} 0, & SOC(t) \geq SOC_u \\ 1, & SOC(t) \leq SOC_l \\ S(t^-), & SOC_l < SOC(t) < SOC_u \end{cases} \quad (1)$$

$$P_b(t) = \begin{cases} 0, & SOC(t) < SOC_u \\ P_l(t) - P_{eopt}, & SOC_l \leq SOC(t) \leq SOC_u \\ P_l(t), & SOC(t) > SOC_u \end{cases} \quad (2)$$

$S(t)$ وضعیت پیل سوختی در زمان حال راهبرد تنظیم دما بان را نشان می‌دهد که به وضعیت پیل سوختی در نمونه

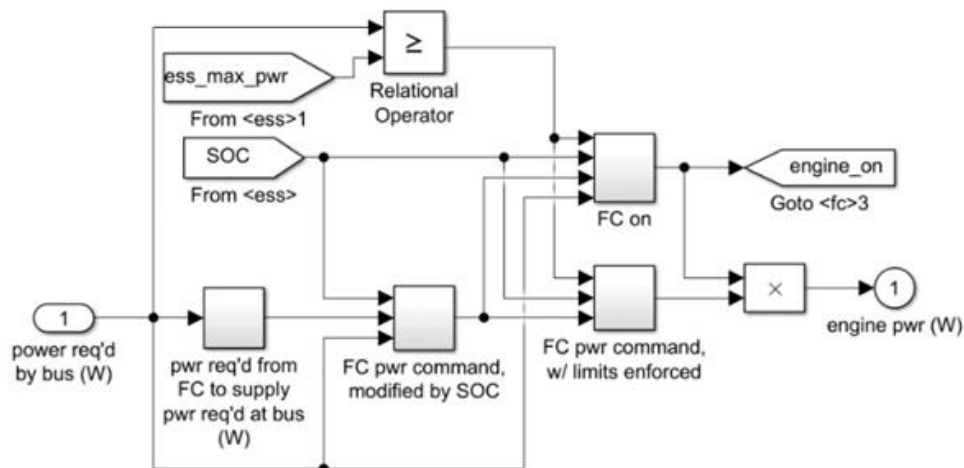
زمان قبلی ($S(t^-)$) مربوط می‌شود. حالت‌های مختلفی عملیاتی راهبرد تنظیم دما بان در شکل ۴ نشان داده شده است. زمانی که توان مورد نیاز از حداکثر توان انبار ($P_1 > P_{bmax}$) بیشتر شود، FC روشن می‌شود ($P_e = P_{eopt}$) تا اختلاف توان را جبران کند بدون اینکه $S(t)$ را به ۱ تغییر دهد. در حالت خاموش بودن FC، انبار تنها منبع توان است، بنابراین تغییرات مکرر توان مورد نیاز بار سنگینی برای انبار به همراه دارد.

¹ Thermostat Control Strategy



شکل ۴ حالت‌های مختلف عملیاتی راهبرد تنظیم دما بان

قسمت راهبرد تنظیم پیل سوختی عمدتاً بر اساس قسمت فرعی FC on است. این قسمت فرعی تنظیم توان FC، سطح بارگیری و تفاوت بین حداکثر توان انباره و توان انباره درخواستی را وارد ورودی می‌کند. بر اساس محدودیت‌های سطح بارگیری، نوع تخلیه انباره (کاهش بارگیری یا حفظ آن) و محدودیت‌های توان مبدل سوخت را تعیین می‌کند که مبدل سوخت چه زمانی فعال شود و چه زمانی فعال نشود. در شکل ۵ طرحواره راهبرد تنظیم پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل ۵ طرحواره راهبرد تنظیم پیل سوختی

راهبردهای تنظیمی در خودروهای برقی پیل سوختی با پیل سوختی و انباره برای بهره‌وری انرژی و مصرف سوخت بسیار مهم هستند. با کاهش بازده پیل سوختی از نظر انرژی و توان، انباره وارد مدار می‌شود تا بازده رانندگی وسیله نقلیه متعادل و در مصرف سوخت خودرو صرفه‌جویی شود. عملکرد سامانه خودروی برقی پیل سوختی، به‌ویژه در هنگام مواجهه با شرایط مختلف جاده، بسته به نیاز خودرو متفاوت است. با توجه به شرایط رانندگی، تغییرات در عملکرد خودرو مانند لحظه شروع حرکت، حرکت با سرعت ثابت، شتاب، کاهش سرعت، افزایش یا کاهش سرعت ناگهانی، حرکت در

سربالایی و سراسیمگی باعث تغییر تقاضای توان خودرو می‌شود. سازوکار تنظیم خودروی برقی پیل سوختی شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن مصرف سوخت خودرو، اشتراک انرژی بین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، محدودیت‌های سطح بارگیری، نوع تخلیه انباره (کاهش بارگیری یا حفظ آن)، چرخه عمر اجزای سامانه و عملکرد خودرو طراحی شده است. تغییر در مصرف هیدروژن یک خودروی برقی پیل سوختی در مسافتی که در چرخه‌های مختلف جاده طی می‌کند از نظر هزینه بسیار مهم است. هدف راهبرد تنظیم کاهش مصرف سوخت پیل سوختی با استفاده از یک انباره در سامانه است. با توانایی خودرو برای ذخیره انرژی ترمز احیا کننده، مصرف سوخت خودرو با موفقیت تضمین می‌شود. در نهایت، متغیرهای مورد استفاده در قسمت راهبرد تنظیم به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که تا حد امکان به عملکرد و مصرف سوخت واقعی خودرو نزدیک شوند که برخی از اساسی‌ترین آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ ویژگی‌های قسمت راهبرد تنظیم

مقدار	ویژگی
۰.۶۰	سطح بارگیری اولیه انباره
۰.۶۸	حداکثر سطح بارگیری انباره
۰.۵۲	حداقل سطح بارگیری انباره
خاموش	وضعیت اولیه پیل سوختی
۱۰۰۰ وات	حداقل توان عملیاتی
۱۱۳۰۰۰ وات	حداکثر توان عملیاتی
۲۰۰۰ وات	عامل اصلاحی برای حفظ سطح بارگیری انباره در محدوده
روشن	راهبرد حفظ بارگیری
خاموش	پیل سوختی همیشه روشن

۳- نتایج و بحث

چرخه رانندگی بیانگر میانگین شرایط رانندگی در یک کشور با فرهنگ خاص به خود و یا یک منطقه جغرافیایی است [۲۴]. به‌طور کلی می‌توان گفت به‌عنوان یک اصطلاح جمعی برای رفتار رانندگی که یک خودرو در طول سفر از خود نشان می‌دهد و ویژگی‌های مسیری که طی می‌کند تعریف می‌شود. در ابتدایی‌ترین مفهوم آن، چرخه رانندگی را می‌توان به‌عنوان یک گزارش وابسته به زمان از سرعت وسیله نقلیه و در نتیجه شتاب آن و همچنین شیب جاده تعریف کرد. بار جاده که به عنوان نیرویی که وسیله نقلیه در طول چرخه رانندگی اعمال می‌کند، تعریف می‌شود، تابعی از ویژگی‌های وسیله نقلیه و سایر عوامل است [۲۵]. لازم به ذکر است که هر جزء از تراز انرژی هم به چرخه رانندگی از جمله سرعت، شتاب و شیب جاده و هم به ویژگی‌های خود وسیله نقلیه از جمله جرم، مساحت جلو و ضریب پسا بستگی دارد. بنابراین، توصیف مصرف سوخت یک وسیله نقلیه در رابطه با چرخه رانندگی خاص ضروری است [۲۶].

نتایج به‌دست آمده در این بخش میزان مصرف سوخت خودروی برقی پیل سوختی را در سه چرخه رانندگی مختلف چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا^۱، چرخه رانندگی جدید اروپا^۲ و الگوی رانندگی توان آزما شهری^۳ نشان می‌دهد. چرخه UDDS به‌طور خاص شرایط رانندگی شهری را شبیه‌سازی می‌کند؛ یعنی رانندگی در مسیری با توقف‌های مکرر، شتاب‌دهی‌های ملایم، سرعت‌های پایین و توقف‌های طولانی که نمایانگر شرایط واقعی آلوده‌شد شهرها هستند. این

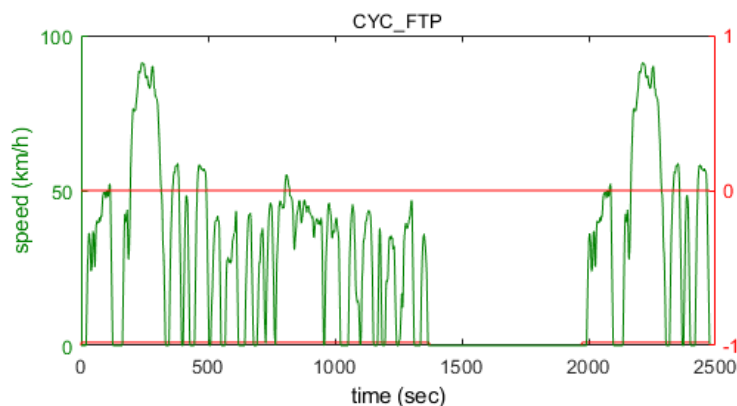
¹ Federal Test Procedure (FTP)

² New European Driving Cycle (NEDC)

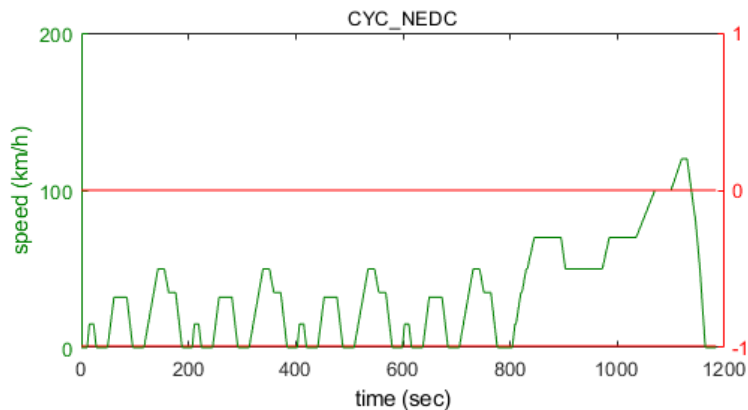
³ Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)

چرخه که گاهی به آن چرخه FTP-72 یا چرخه LA4 نیز گفته می‌شود، در درجه اول برای ارزیابی مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های خودرو در محیط‌های شهری استفاده می‌شوند.

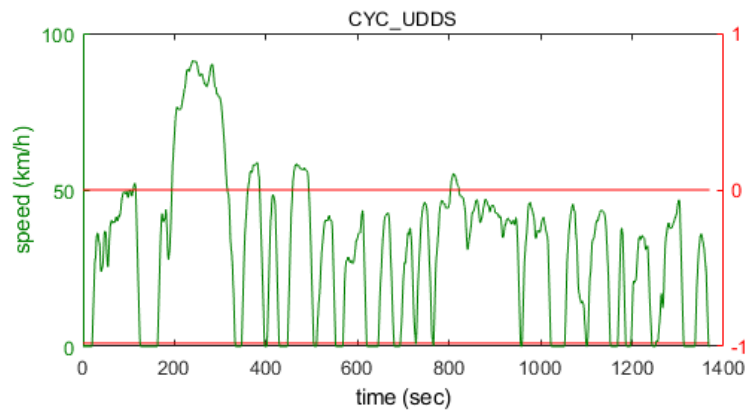
از سوی دیگر، چرخه FTP یک رویه جامع‌تر و چندبخشی است که برای آزمون انتشار آلاینده‌ها و رفتار کلی خودرو تحت شرایط مختلف (از جمله رانندگی شهری، جاده‌ای و آزمایش‌های شروع سرد) توسط سازمان محیط زیست فدرال طراحی شده است. در بسیاری از نسخه‌های چرخه FTP، بخش ابتدایی آزمون همان چرخه UDDS را شامل می‌شود و سپس با افزودن قطعات دیگری (مانند آزمایش‌های مربوط به رانندگی در سرعت‌های بالاتر یا شرایط حمل‌ونقل متفاوت) به یک الگوی جامع تبدیل می‌گردد. به بیان ساده‌تر، چرخه UDDS به عنوان یک قسمت از چرخه FTP در نظر گرفته می‌شود که تمرکزش صرفاً بر شرایط شهری است، در حالی که چرخه FTP نمایانگر شرایط عملی و جامع‌تری از رانندگی خودرو در طرح‌های متفاوت است. این تمایز باعث می‌شود که نتایج به‌دست آمده از هر کدام برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار گیرد؛ به عنوان مثال، نتایج چرخه UDDS بیشتر منعکس‌کننده عملکرد خودرو در آلوده‌شدن شهری هستند، در حالی که نتایج چرخه FTP دید کلی‌تری ارائه می‌دهد که شامل پاسخ خودرو در شرایط متفاوت و ترکیبی از الگوهای رانندگی است [۲۷]. چرخه NEDC یک استاندارد اروپایی است که آخرین بار در سال ۱۹۹۷ به‌روز رسانی شد و برای ارزیابی مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های خودروها است. این چرخه شرایط رانندگی در شهر را شبیه‌سازی می‌کند، شامل توقف‌های مکرر، شتاب‌گیری‌های ملایم است. مدت زمان کل چرخه ۱۱۸۰ ثانیه است و مسافتی حدود ۱۱ کیلومتر را پوشش می‌دهد [۲۸]. در شکل‌های ۶ الی ۸ نمودار سرعت بر حسب زمان سه چرخه بحث شده در بالا آورده شده است.



شکل ۶ نمودار سرعت- زمان چرخه رانندگی FTP

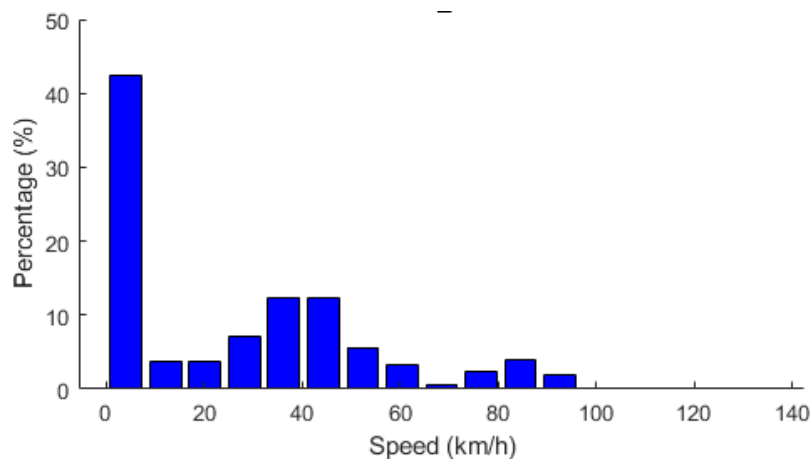


شکل ۷ نمودار سرعت- زمان چرخه رانندگی NEDC

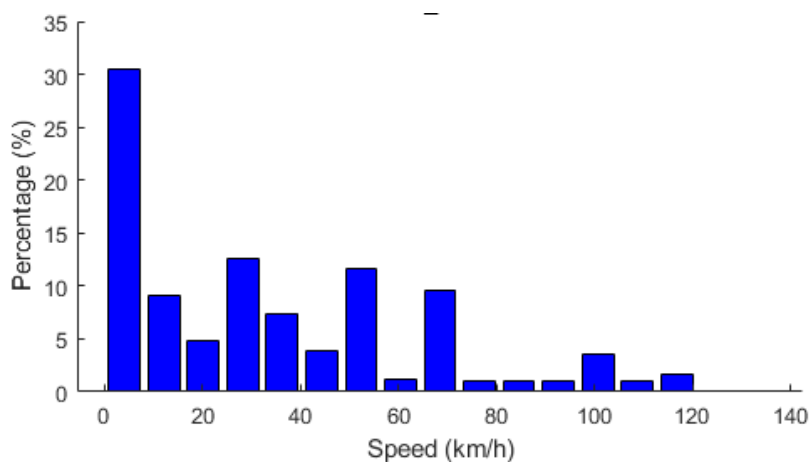


شکل ۸ نمودار سرعت-زمان چرخه رانندگی UDDS

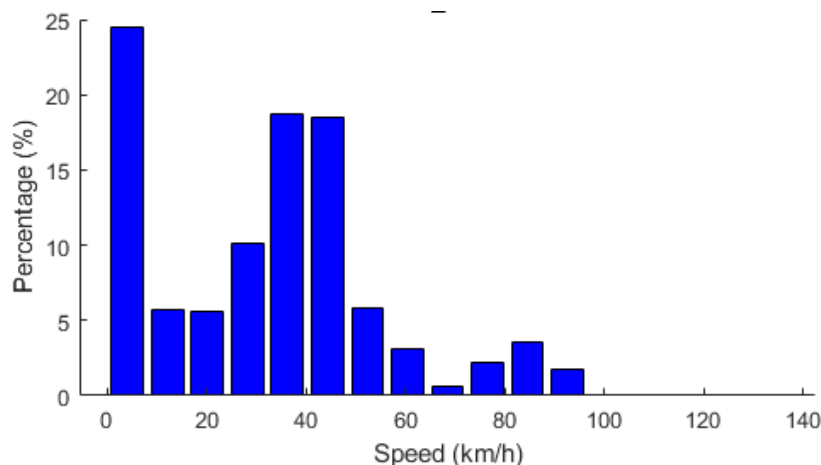
همچنین شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ پراکندگی درصد سرعت هر چرخه را نمایش داده است. لازم به ذکر است نتایج بدست آمده در این پژوهش یک بار برای وضعیت بدون تأثیر شیب جاده و ضریب پسای هواپوشی و یک بار با در نظر گرفتن تأثیر شیب جاده و ضریب پسای هواپوشی به دست آمده است.



شکل ۹ نمودار درصد-سرعت چرخه رانندگی FTP



شکل ۱۰ نمودار درصد-سرعت چرخه رانندگی NEDC



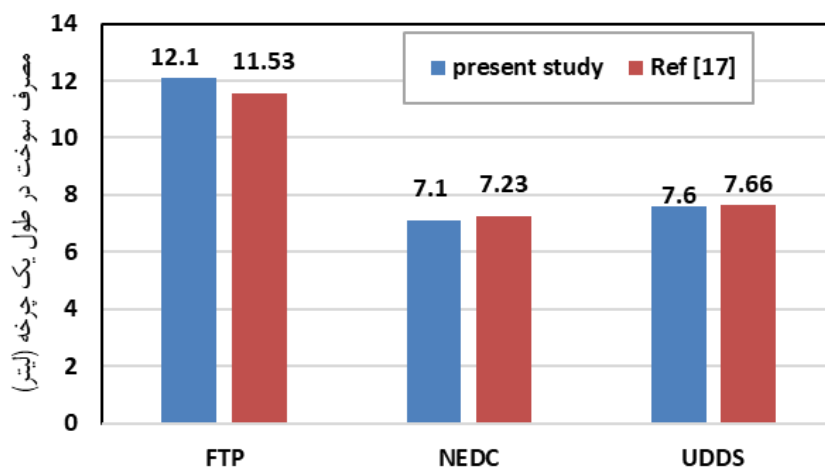
شکل ۱۱ نمودار درصد- سرعت چرخه رانندگی UDDS

۳-۱- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در چرخه‌های رانندگی

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش انجام شده در دانشگاه پلی تکنیک ایتالیا مقایسه شد تا از معتبر بودن نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود. نتایج پژوهش ایتالیایی از اعتبار خوبی برخوردار است زیرا این نتایج با نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشگاه ملی آرگون اعتبارسنجی شده است. جدول ۵ و شکل ۱۲ مصرف سوخت هیدروژن خودروی برقی پیل سوختی را در طول یک چرخه و بدون تأثیر شیب جاده در سه چرخه مختلف FTP، NEDC و UDDS به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. در جدول ۵ ردیف ۱ نتایج مطالعه حاضر و ردیف ۲ نتایج معیار اعتبارسنجی است. همچنین در شکل ۱۲ نمودار شماره ۱ مربوط به پژوهش حاضر و نمودار شماره ۲ مربوط به پژوهش معیار اعتبارسنجی است.

جدول ۵ مقایسه مصرف سوخت هیدروژن در طول هر چرخه رانندگی

	چرخه UDDS	چرخه NEDC	چرخه FTP
پژوهش حاضر	۷٫۶ لیتر	۷٫۱ لیتر	۱۲٫۱ لیتر
مرجع [۲۱]	۷٫۶۶ لیتر	۷٫۲۳ لیتر	۱۱٫۵۳ لیتر



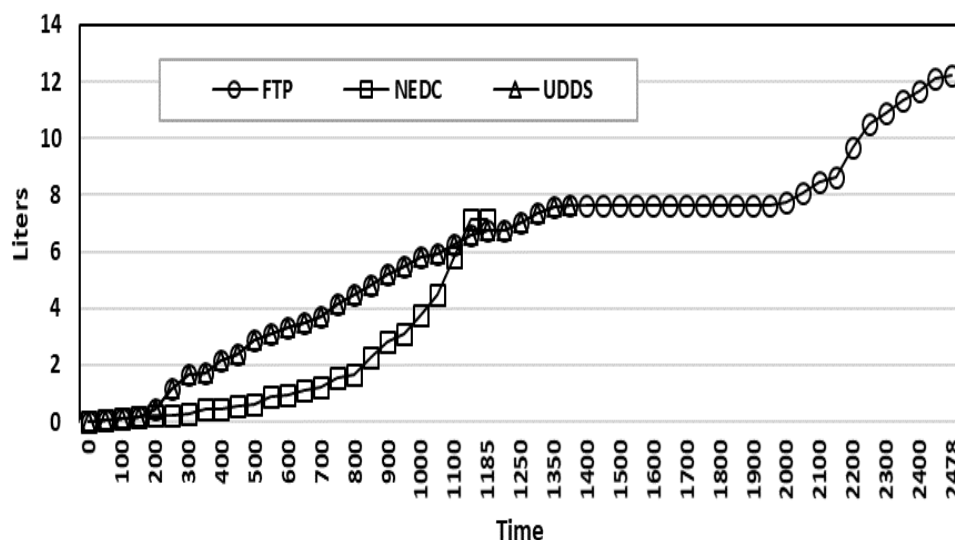
شکل ۱۲ مقایسه مصرف سوخت هیدروژن در طول هر چرخه رانندگی

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۵ نشان داده شده است، درصد اختلاف مصرف سوخت هیدروژن در یک چرخه برای این شبیه‌سازی ۴,۹ درصد در چرخه FTP، ۱,۷ درصد در چرخه NEDC و ۰,۷ درصد در چرخه UDSS است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد الگو شبیه‌سازی شده تا حد مطلوبی دارای دقت مورد نیاز می‌باشد و می‌توان به نتایج آن اتکا نمود.

در مورد چرخه رانندگی FTP باید توجه داشت که این اختلاف درصد ممکن است به دلیل ماهیت خود چرخه بیشتر باشد که شروع و توقف آن با حداکثر سرعت بیشتر و همچنین زمان طولانی‌تری نسبت به سایر چرخه‌ها دارد. پس از اطمینان از نتایج شبیه‌سازی در زیر بخش‌های بعد تأثیر متغیرهای شیب جاده و ضریب پسا هواپوشی بر مصرف سوخت بررسی خواهد شد.

۳-۲- نتایج بدون تأثیر شیب جاده

شکل ۱۳ نتایج مصرف سوخت هیدروژن به ازای طی نمودن سه چرخه FTP، NEDC و UDSS را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۶ نتایج مربوط به میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت معادل بنزین و مسافت طی شده در هر سه چرخه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی UDSS و NEDC، FTP

جدول ۶ مقایسه مصرف سوخت هیدروژن در هر چرخه رانندگی

چرخه UDSS	چرخه NEDC	چرخه FTP	ویژگی
۶۳,۱ لیتر	۶۵,۵ لیتر	۶۸,۹ لیتر	میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر
۴,۳ لیتر	۴,۴ لیتر	۴,۷ لیتر	مصرف سوخت معادل بنزین
۱۲ کیلومتر	۱۰,۹ کیلومتر	۱۷,۸ کیلومتر	مسافت طی شده

در چرخه رانندگی FTP، خودروی برقی پیل سوختی مسافتی معادل ۱۷,۸ کیلومتر را طی کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصرف سوخت در یک چرخه ۱۲,۱ لیتر هیدروژن، میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر ۶۸,۹ لیتر هیدروژن و مصرف سوخت معادل ۴,۷ لیتر بنزین است. در چرخه NEDC، خودرو پیل سوختی مسافت ۱۰,۹ کیلومتر را

طی کرده است و شکل ۱۳ مصرف سوخت هیدروژن را در این چرخه نشان می‌دهد. در این چرخه رانندگی، میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر ۶۵٫۵ لیتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۷٫۱ لیتر هیدروژن و مصرف سوخت معادل بنزین ۴٫۴ لیتر است. سومین چرخه رانندگی که در آن مصرف سوخت هیدروژن خودروی برقی پیل سوختی شبیه‌سازی شد، چرخه UDSS است. میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر ۶۳٫۱ لیتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۷٫۶ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۴٫۳ لیتر است و خودروی برقی پیل سوختی در این چرخه ۱۲ کیلومتر را طی کرده است.

۳-۳- نتایج با تأثیر شیب جاده

شیب جاده یکی از عوامل اصلی موثر بر مصرف سوخت خودرو است [۲۹]. شیب جاده اغلب در مطالعات مربوط به مصرف سوخت و عملکرد خودرو نادیده گرفته می‌شود. چنین وضعیتی باعث خطاهای محاسباتی قابل توجهی در هنگام ارزیابی عملکرد خودرو می‌شود. در این قسمت مصرف سوخت هیدروژن در سه چرخه رانندگی مختلف FTP، NEDC و UDSS شبیه‌سازی شده است. حداکثر شیب طولی برای آزادراه، بزرگراه و راه‌های اصلی در ایران بر اساس آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا) ضابطه شماره ۱-۸۰۰ با توجه به سه منطقه هموار، تپه ماهور و کوهستانی ۳ تا ۶ درصد است که در جدول ۷ نشان داده شده است [۳۰].

جدول ۷ حداکثر شیب طولی برای آزادراه، بزرگراه و راه‌های اصلی در ایران [۳۰]

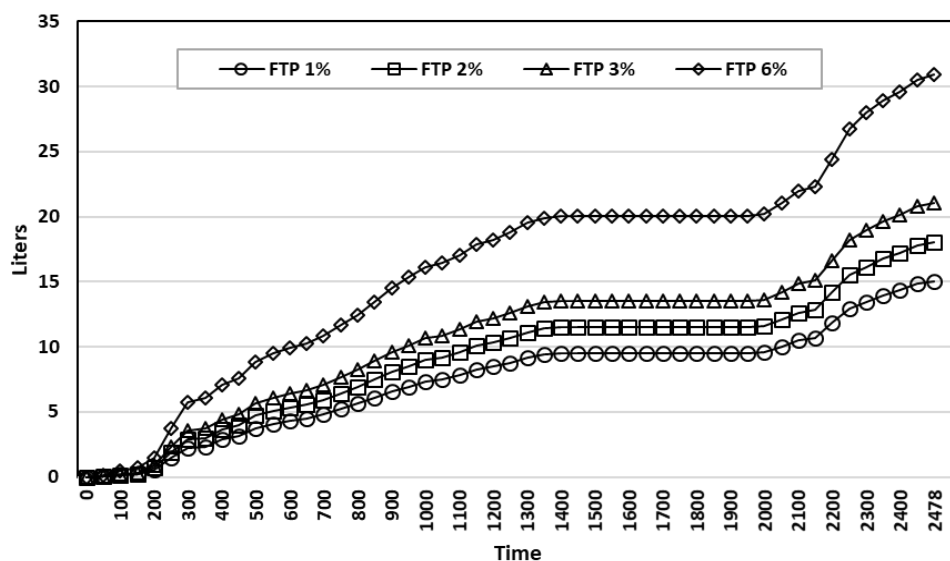
سرعت طرح (کیلومتر در ساعت)						
نوع منطقه	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰
هموار	۴ درصد	۴ درصد	۴ درصد	۳ درصد	۳ درصد	۳ درصد
تپه ماهور	۵ درصد	۵ درصد	۵ درصد	۴ درصد	۴ درصد	-
کوهستانی	۶ درصد	۶ درصد	۶ درصد	۵ درصد	-	-

برای شبیه‌سازی شرایط واقعی، معمولاً بین شیب ملایم (حدود ۱ تا ۳ درصد) استفاده می‌شود. این شیب‌ها برای ارزیابی اثرات واقعی بر مصرف سوخت و عملکرد خودرو در نظر گرفته شده است [۳۱]. شیب ۳ درصد نشان‌دهنده تعادل بهینه بین مصرف کلی سوخت و سرعت خودرو است؛ بیش از ۳ درصد مصرف کلی سوخت به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و سرعت خودرو به شدت کاهش می‌یابد [۳۲]. از این رو در این شبیه‌سازی، شیب جاده در نظر گرفته شده به ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۶ درصد است.

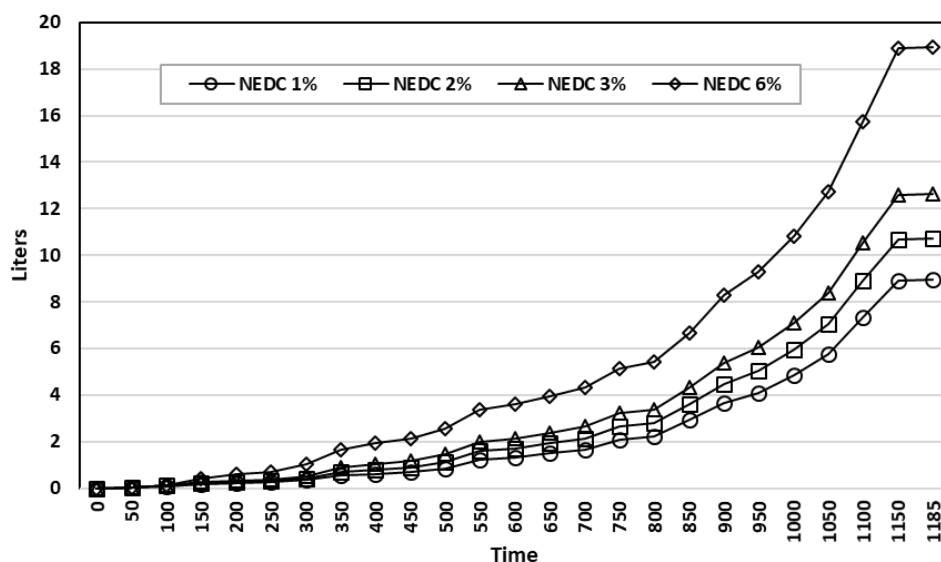
شکل ۱۴ نتایج مصرف سوخت چرخه FTP را در شیب‌های ۱، ۲، ۳ و ۶ درصد نشان می‌دهد. در این چرخه خودروی برقی پیل سوختی مسافت ۱۷٫۸ کیلومتر را در زمان ۲۴۷۷ ثانیه طی کرده است.

در شیب ۱ درصد میانگین مصرف سوخت هیدروژن ۸۴٫۸ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۱۵٫۰۶ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۵٫۷ لیتر است. در شیب ۲ درصد میانگین مصرف سوخت هیدروژن ۱۰۱٫۴ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۱۸٫۰۱ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۶٫۹ لیتر است. در شیب ۳ درصد میانگین مصرف سوخت هیدروژن ۱۱۸٫۶ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۲۱٫۰۵ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۸ لیتر است. در شیب ۶ درصد میانگین مصرف سوخت هیدروژن ۱۷۴٫۱ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت در یک چرخه ۳۰٫۹۳ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۱۱٫۸ لیتر است.

شکل ۱۵ اثر شیب‌های ذکر شده را بر مصرف سوخت هیدروژن در چرخه NEDC نشان می‌دهد. در این چرخه خودروی برقی پیل سوختی مسافت ۱۰٫۹ کیلومتر را در زمان ۱۱۸۵ ثانیه طی کرده است.



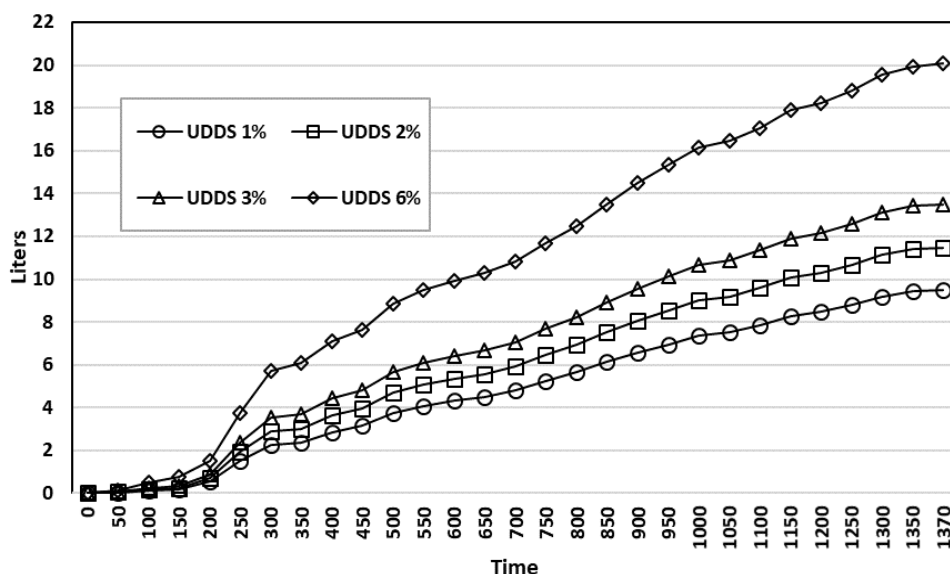
شکل ۱۴ مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی FTP با شیب‌های ۱، ۲، ۳ و ۶ درصد



شکل ۱۵ مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی NEDC با شیب‌های ۱، ۲، ۳ و ۶ درصد

در این چرخه رانندگی، میانگین مصرف سوخت هیدروژن در شیب ۱ درصد ۸٫۸۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت هیدروژن در یک چرخه ۸٫۹۴ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۵٫۵ لیتر است. میانگین مصرف سوخت هیدروژن در شیب ۲ درصد ۹٫۸۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت هیدروژن در یک چرخه ۱۰٫۷۲ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۶٫۶ لیتر است. میانگین مصرف سوخت هیدروژن در شیب ۳ درصد ۹٫۸۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت هیدروژن در یک چرخه ۱۰٫۷۲ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۶٫۶ لیتر است. میانگین مصرف سوخت هیدروژن در شیب ۶ درصد ۱۷٫۳۴ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، مصرف سوخت هیدروژن در یک چرخه ۱۸٫۹۵ لیتر و مصرف سوخت معادل بنزین ۱۱٫۷ لیتر است.

در زیر، نتایج به دست آمده تحت تأثیر شیب‌های ۱، ۲، ۳ و ۶ درصدی جاده برای چرخه UDDS در شکل ۱۶ قابل مشاهده است. در این چرخه خودروی برقی پیل سوختی مسافت ۱۲ کیلومتر را در زمان ۱۳۷۰ ثانیه طی کرده است.



شکل ۱۶ مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی UDDS با شیب‌های ۱، ۲، ۳ و ۶ درصد

در شیب ۱ درصد سوخت هیدروژن مصرفی در یک چرخه ۹,۴۹ لیتر، میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر ۷۹,۲ لیتر، و مصرف سوخت معادل بنزین ۵,۴ لیتر است. در شیب ۲ درصد سوخت هیدروژن مصرفی در یک چرخه ۱۱,۴۷ لیتر، میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر ۹۵,۷ لیتر، و مصرف سوخت معادل بنزین ۶,۵ لیتر است. در شیب ۳ درصد سوخت هیدروژن مصرفی در یک چرخه ۱۳,۵۰ لیتر، میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر ۱۱۲,۶ لیتر، و مصرف سوخت معادل بنزین ۷,۶ لیتر است. در شیب ۶ درصد سوخت هیدروژن مصرفی در یک چرخه ۲۰,۰۸ لیتر، میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر ۱۶۷,۵ لیتر، و مصرف سوخت معادل بنزین ۱۱,۳ لیتر است.

۳-۴- اثر ضریب پسا هواپوشی

یکی دیگر از عوامل موثر بر مصرف سوخت، ضریب پسا هواپوشی است. علاوه بر این، این متغیر به نزدیک شدن شبیه‌سازی به شرایط واقعی رانندگی کمک می‌کند. در این قسمت از شبیه‌سازی، اثر ضریب پسای هواپوشی بین ۰,۲۶ تا ۰,۳ بررسی شد تا تأثیر آن بر میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر از هر چرخه رانندگی مشخص شود. علت انتخاب این بازه تغییرات ضریب پسا استناد به مقالات معتبر و انتخاب مقادیر معمول و رایج این ویژگی است [۲۳، ۳۴]. چرخه‌های رانندگی انتخاب شده برای این شبیه‌سازی، سه چرخه رانندگی FTP، NEDC و UDDS هستند.

در جدول ۸، تغییرات میانگین مصرف سوخت هیدروژن در هر ۱۰۰ کیلومتر در چرخه‌های رانندگی ذکر شده متناسب با افزایش ضریب پسا هواپوشی مشاهده می‌شود.

جدول ۸ تغییرات میانگین مصرف سوخت هیدروژن (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر) بر اثر افزایش ضریب پسا

چرخه UDDS	چرخه NEDC	چرخه FTP	بازه تغییرات
۶۲,۹۷	۶۴,۳۷	۶۸,۲۰	۰,۲۶-۰,۲۷
۶۳,۲۸	۶۴,۹۰	۶۸,۵۷	۰,۲۷-۰,۲۸
۶۳,۵۹	۶۵,۴۶	۶۸,۹۴	۰,۲۸-۰,۲۹
۶۳,۹۱	۶۶,۰۱	۶۹,۳۲	۰,۲۹-۰,۳۰

۳-۵- بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی در چرخه‌های رانندگی

در زیربخش ۳-۲ با بررسی شکل ۱۳ و جدول ۶ مشاهده شد نتایج بدست آمده با خطایی کمتر از ۴ درصد با نتایج آزمایشگاه ملی آرگون مطابقت دارد و صحت شبیه‌سازی انجام شده تأیید می‌گردد. در زیربخش ۳-۳ شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ میزان مصرف سوخت در هر چرخه را نشان داد، همان‌طور که انتظار می‌رفت با تأثیر شیب جاده و افزایش مقدار شیب میزان مصرف سوخت هیدروژن افزایش یافت. علاوه بر آن جدول ۹ این میزان افزایش را برای هر چرخه به طور دقیق نمایش داده است.

جدول ۹ مقایسه افزایش مصرف سوخت هیدروژن در هر چرخه با تأثیر شیب جاده

چرخه رانندگی	درصد شیب جاده	افزایش مصرف سوخت هر چرخه (لیتر)	افزایش مصرف سوخت میانگین لیتر در ۱۰۰ کیلومتر	افزایش مصرف سوخت معادل با بنزین (لیتر)	مسافت طی شده در هر چرخه (کیلومتر)
چرخه FTP	۱	۲,۹۶	۱۵,۹	۱	۱۷,۸
	۲	۵,۹۱	۳۲,۵	۲,۲	۱۷,۸
	۳	۸,۹۵	۴۹,۷	۳,۳	۱۷,۸
	۶	۱۸,۸۳	۱۰۵,۲	۷,۱	۱۷,۸
چرخه NEDC	۱	۱,۸۴	۱۶,۳	۱,۱	۱۰,۹
	۲	۳,۶۲	۳۲,۶	۲,۲	۱۰,۹
	۳	۵,۵۲	۵۰	۳,۴	۱۰,۹
	۶	۱۱,۸۵	۱۰۷,۹	۷,۳	۱۰,۹
چرخه UDDS	۱	۱,۸۹	۱۶,۱	۱,۱	۱۲
	۲	۳,۸۷	۳۲,۶	۲,۲	۱۲
	۳	۵,۹	۴۹,۵	۳,۳	۱۲
	۶	۱۲,۴۸	۱۰۴,۴	۷	۱۲

همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده شد با افزایش درصد شیب جاده مصرف سوخت خودروی برقی پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. در چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا با افزایش شیب جاده از صفر درصد به ۱ درصد افزایش مصرف سوخت ۲۴,۴۶ درصد است. با افزایش شیب جاده از ۱ به ۲ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۴,۳۸ درصد و همچنین برای شیب جاده از ۲ تا ۳ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۵,۱۳ درصد است. در شیب جاده ۶ درصد میزان مصرف سوخت تا ۱,۵۶ برابر افزایش یافته است.

در چرخه رانندگی جدید اروپا با افزایش شیب جاده از صفر به ۱ درصد افزایش مصرف سوخت به مقدار ۲۵,۹۲ درصد بوده است. با افزایش شیب جاده از ۱ به ۲ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۵,۰۷ درصد و همچنین برای شیب جاده از ۲ تا ۳ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۵,۷۶ درصد است. در شیب جاده ۶ درصد میزان مصرف سوخت تا ۱,۶۷ برابر افزایش یافته است.

در چرخه رانندگی توان آزمایش شهری با افزایش شیب جاده از صفر به ۱ درصد افزایش مصرف سوخت به مقدار ۲۴,۸۶ درصد بوده است. با افزایش شیب جاده از ۱ به ۲ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۶,۰۵ درصد و همچنین برای شیب جاده از ۲ تا ۳ درصد نیز افزایش مصرف سوخت هیدروژن ۲۶,۷۱ درصد است. در شیب جاده ۶ درصد میزان مصرف سوخت تا ۱,۶۴ برابر افزایش یافته است.

با توجه به این موارد می‌توان نتیجه گرفت که در این خودرو پیل سوختی شبیه‌سازی شده به‌ازای هر یک درصد شیب جاده به‌طور میانگین ۲۵ درصد مصرف سوخت هیدروژن افزایش می‌یابد. برای صحت‌سنجی این نتیجه به پژوهش‌های دیگر که توسط نتایج واقعی و عملی ارزیابی و صحت‌گذاری شده بود مراجعه شد که در برخی موارد تا ۵۹,۳۳ درصد نیز افزایش مصرف انرژی و ۲,۴۱ برابر مصرف سوخت مشاهده شد [۳۲، ۳۵]. مقدار مصرف سوخت خودروی برقی پیل سوختی تحت تأثیر راهبرد مدیریت انرژی و ظرفیت انباره قرار دارد زیرا در هنگامی که خودرو بر اثر شیب جاده تقاضای انرژی بیشتری دارد، انرژی درخواستی با جابه‌جایی بین منابع انرژی تأمین می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که شیب جاده عامل مهمی در افزایش مصرف سوخت هیدروژنی است، بنابراین محققان نباید در تحقیقات خود از این ویژگی مهم غافل شوند.

با بررسی و مقایسه نتایج جدول ۸، اثر افزایش ۰,۰۱ ضریب درگ هواپوشی بر روی میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر در چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا برابر با ۰,۳۸ لیتر و معادل با ۰,۵۶ درصد، برای چرخه رانندگی جدید اروپا برابر با ۰,۵۵ و معادل ۰,۸۶ درصد و برای چرخه رانندگی توان آزما شهری برابر با ۰,۳۱ لیتر و معادل ۰,۴۸ درصد است. به‌طور کلی افزایش ضریب پسا هواپوشی از ۰,۲۶ تا ۰,۳۰ میانگین مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر را برای چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا ۲,۲۱ درصد، چرخه رانندگی جدید اروپا ۳,۴۳ درصد و چرخه رانندگی توان آزما شهری ۱,۹۷ درصد افزایش می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک الگوی متلب/سیمولینک با استفاده از نرم‌افزار آدوایزر برای شبیه‌سازی کل سامانه خودروی برقی پیل سوختی و یک راهبرد تنظیم نوآورانه بر مبنای راهبرد تنظیم دما بان در چرخه‌های مختلف رانندگی توسعه داده شد. جنبه تجربی این مطالعه استفاده از نتایج آزمایش‌های واقعی انجام شده در آزمایشگاه ملی آرگون بر روی یک وسیله نقلیه واقعی (تویوتا میرای) است که معیار صحت‌سنجی نتایج است. مطالعه حاضر با مقایسه نتایج آزمایش‌ها واقعی و شبیه‌سازی نرم‌افزار آدوایزر توانست دقت و قابلیت اطمینان شبیه‌سازی را در مصرف سوخت چرخه‌های رانندگی مختلف ارزیابی کند. مشخص شد که الگو سریع است و نتایج پایدار و قابل اعتمادی را ارائه می‌دهد. سپس، این الگو برای شبیه‌سازی مصرف سوخت هیدروژن در سه چرخه رانندگی مختلف استفاده شد. چرخه‌های FTP، NEDC و UDSS همگی مقادیر مصرف سوخت پایینی را ارائه می‌دهند (بویژه چرخه رانندگی جدید اروپا) زیرا هم چرخه‌های بار کم هستند و هم نشان دهنده کارآمدی راهبرد تنظیم به کار گرفته است. سپس اثرات ویژگی‌هایی مانند شیب جاده و ضریب پسا هواپوشی بررسی شد و نشان داد مصرف سوخت هیدروژن در چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا به‌ازای افزایش یک درصدی ۲۴,۶۶ درصد افزایش یافته است. در چرخه رانندگی جدید اروپا این افزایش مصرف سوخت هیدروژن به‌طور میانگین برابر با ۲۵,۹۲ درصد است. همچنین در چرخه رانندگی توان آزما شهری افزایش مصرف سوخت هیدروژن به‌ازای افزایش یک درصدی شیب جاده به‌طور میانگین برابر با ۲۵,۸۷ درصد است.

با افزایش ضریب پسا هواپوشی به مقدار ۰,۰۴، میانگین مصرف سوخت در چرخه رانندگی شهری فدرال آمریکا ۲,۲۱ درصد، در چرخه رانندگی جدید اروپا ۳,۴۳ درصد و در چرخه رانندگی توان آزما شهری ۱,۹۷ درصد افزایش داشته است. در نهایت، این مطالعه نتایج مهمی در مورد حساسیت سنجی مصرف سوخت هیدروژن نسبت به ویژگی‌های شیب جاده و ضریب پسا هواپوشی ارائه داده است.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده، می‌توان به این نکته اشاره کرد که خودروهای برقی پیل سوختی جایگاه مهمی در آینده دنیای خودرو دارند و به‌دلیل عملکرد بدون آلاینده خود، توجه بسیاری را به خود جلب خواهند کرد.

References

- [1] Xu L, Huangfu Y, Ma R, Xie R, Song Z, Zhao D, Yang Y, Wang Y, Xu L. A comprehensive review on fuel cell UAV key technologies: Propulsion system, management strategy, and design procedure. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022 Aug 1;8(4):4118-39. doi: [10.1109/TTE.2022.3195272](https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3195272)
- [2] Förster R, Kaiser M, Wenninger S. Future vehicle energy supply-sustainable design and operation of hybrid hydrogen and electric microgrids. *Applied energy*. 2023 Mar 15;334:120653. doi: [10.1016/j.apenergy.2023.120653](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120653)
- [3] Zhou J, Liu J, Xue Y, Liao Y. Total travel costs minimization strategy of a dual-stack fuel cell logistics truck enhanced with artificial potential field and deep reinforcement learning. *Energy*. 2022 Jan 15;239:121866. doi: [10.1016/j.energy.2021.121866](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121866)
- [4] Wang T, Li Q, Yin L, Chen W, Breaz E, Gao F. Hierarchical power allocation method based on online extremum seeking algorithm for dual-PEMFC/battery hybrid locomotive. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021 May 31;70(6):5679-92. doi: [10.1109/TVT.2021.3078752](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3078752)
- [5] Khalatbarisoltani A, Kandidayeni M, Boulon L, Hu X. Power allocation strategy based on decentralized convex optimization in modular fuel cell systems for vehicular applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020 Oct 1;69(12):14563-74. doi: [10.1109/TVT.2020.3028089](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3028089)
- [6] Kendall K. Hydrogen and fuel cells in city transport. *International Journal of Energy Research*. 2016 Jan;40(1):30-5. doi: [10.1002/er.3290](https://doi.org/10.1002/er.3290)
- [7] Badji A, Abdeslam DO, Becherif M, Eltoumi F, Benamrouche N. Analyze and evaluate of energy management system for fuel cell electric vehicle based on frequency splitting. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020 Jan 1;167:65-77. doi: [10.1016/j.matcom.2019.02.014](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.02.014)
- [8] Xun Q, Murgovski N, Liu Y. Joint component sizing and energy management for fuel cell hybrid electric trucks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022 Feb 24;71(5):4863-78. doi: [10.1109/TVT.2022.3154146](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3154146)
- [9] Wang K, Song H, Guo Z, Zhang X. Automated multi-dimensional dynamic planning algorithm for solving energy management problems in fuel cell electric vehicles. *Energy*. 2025 Feb 1;316:134408. doi: [10.1016/j.energy.2025.134408](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134408)
- [10] Toyota motor corporation official global website Available from: http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehi/
- [11] Zhang W, Fang X, Sun C. The alternative path for fossil oil: Electric vehicles or hydrogen fuel cell vehicles?. *Journal of Environmental Management*. 2023 Sep 1;341:118019. doi: [10.1016/j.jenvman.2023.118019](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118019)
- [12] Bonci M. Fuel cell vehicle simulation: an approach based on Toyota Mirai [master's thesis]. Turin (Italy): Polytechnic University of Turin; 2021.
- [13] Zhang Y, Fan P, Lu H, Song G. Fuel consumption of hybrid electric vehicles under real-world road and temperature conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025 May 1;142:104691. doi: [10.1371/journal.pone.0317098](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317098)
- [14] Dhieb Y, Ayadi W, Yaich M, Ghariani M. Powertrain Design and Modeling for a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025 Feb 2;15(1):19636-45. doi: [10.48084/etasr.9384](https://doi.org/10.48084/etasr.9384)
- [15] Sahin H, Esen H. Performance and energy analysis of a fuel cell electric vehicle (november 2024). *IEEE Access*. 2025 Feb 10. doi: [10.1109/ACCESS.2025.3540715](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3540715)
- [16] Mostasharshahidi S, Salamat MK, Ghobadian B, Masih-Tehrani M. Agricultural tractor driving cycle extraction using artificial intelligence. *The Journal of Engine Research*. 2024 Feb 20;70(4):14-26. doi: [10.22034/ER.2024.2024942.1028](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2024942.1028)
- [17] Bagheri E, Masih-Tehrani M, Azadi M, Moosavian A, Sayegh S, Hakimollahi M. Unveiling the impact of date-specific analytics on vehicle fuel consumption and emissions: A case study of Shiraz city. *Heliyon*. 2024 Sep 15;10(17). doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e36713](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36713)
- [18] Bagheri E, Tehrani MM, Azadi M, Moosavian A. Impact of driving characteristic parameters and vehicle type on fuel consumption and emissions performance over real driving cycles. *PLoS One*. 2025 Jan 13;20(1):e0317098. doi: [10.1371/journal.pone.0317098](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317098)
- [19] Sina N, Esfahanian V, Reza Hairi Yazdi M. On the estimation of optimal state-of-charge trajectory for plug-in hybrid electric buses using trip information. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2022 Jul;236(8):1910-26. doi: 10.1177/09544070211041073
- [20] Frey HC, Roupail NM, Zhai H, Farias TL, Gonçalves GA. Comparing real-world fuel consumption for diesel-and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2007 Jun 1;12(4):281-91. doi: 10.1016/j.trd.2007.03.003
- [21] Lohse-Busch H, Stutenberg K, Duoba M, Iliev S. Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 Toyota Mirai. Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States); 2018 Jan 1. doi: 10.2172/1463251
- [22] Kelly KJ, Rajagopalan A. Benchmarking of OEM hybrid electric vehicles at NREL. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory; 2001 Aug.
- [23] Burress TA, Campbell SL, Coomer C, Ayers CW, Wereszczak AA, Cunningham JP, Marlino LD, Seiber LE, Lin HT. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Power Electronics and Electric Machinery Research Facility; 2011 Mar 1. doi: 10.2172/1007833
- [24] 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. *The Journal of Engine Research*. 2024 Jun 21;71(2):1-7. doi: 10.22034/ER.2024.2025374.1042. [In Persian]
- [25] Carignano M, Roda V, Costa-Castelló R, Valiño L, Lozano A, Barreras F. Assessment of energy management in a fuel cell/battery hybrid vehicle. *IEEE access*. 2019 Feb 1;7:16110-22. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2889738
- [26] Yue M, Jemei S, Gouriveau R, Zerhouni N. Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019 Mar 8;44(13):6844-61. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.190
- [27] United States Environmental Protection Agency. 2025 Apr 18. Available from: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>
- [28] Mohammadebrahim A, Kocharian A. Simulation of a vehicle equipped with a proton exchange membrane fuel cell and investigating the effect of related parameters. *The Journal of Engine Research*. 2023 Mar 21;70(1):28-46. doi: 10.22034/er.2023.1975326.0 [In Persian]
- [29] Travasset-Baro O, Rosas-Casals M, Jover E. Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015 Jan 1;34:16-26. doi: 10.1016/j.trd.2014.09.006
- [30] Management and Planning Organization of Iran. Iran highway design: geometric design standards. Regulation No. 800-1. Tehran: Deputy Director of Production, Technical and Infrastructure Affairs for Technical and Executive System Affairs; 2024 Oct 13. [In Persian]
- [31] Liu K, Yamamoto T, Morikawa T. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017 Jul 1;54:74-81. doi: 10.1016/j.trd.2017.05.005
- [32] Jiang B, Yang D, Yu H, Wang J, He C, Li J, Chen Y. Impact of Road Gradient on Fuel Consumption of Light-Duty Diesel Vehicles. *Atmosphere*. 2025 Jan 28;16(2):143. doi: 10.3390/atmos16020143
- [33] Jaura A. Styling for Coefficient of Drag Reduction. *Auto Tech Review*. 2013 Nov;2(11):64-. doi: 10.1365/s40112-013-0469-6
- [34] Altinisik A. Aerodynamic coastdown analysis of a passenger car for various configurations. *International Journal of Automotive Technology*. 2017 Apr;18(2):245-54. doi: 10.1007/s12239-017-0024-6
- [35] Hebala A, Abdelkader MI, Ibrahim RA. Comparative Analysis of Energy Consumption and Performance Metrics in Fuel Cell, Battery, and Hybrid Electric Vehicles Under Varying Wind and Road Conditions. *Technologies*. 2025 Apr 9;13(4):150. doi: 10.3390/technologies13040150