



Development of a Novel Sizing Software for Plug-In Hybrid Electric Vehicles

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Moeinian M.¹ MSc,

Taghavipour A.^{*1} PhD

How to cite this article

Moeinian M, Taghavipour A. Development of a Novel Sizing Software for Plug In Hybrid Electric Vehicles. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):3051-3062.

ABSTRACT

The plug-in hybrid electric powertrain is a new technology and a suitable option to reduce the volume of pollutants in the city. The batteries in these systems can be plugged into an external source in addition to recharging by the combustion engine and regenerative braking. These vehicles have larger full electric range because of their relatively large batteries. As a result, the fuel consumption of these vehicles is low. The aim of this research is the development of a smart sizing and simulation software for plug-in hybrid electric vehicles. The size of the combustion engine, electric motor and battery are calculated in the software according to the input based on the performance of components. Then fuel consumption and emissions of pollutants are estimated in a standard drive cycle using a predictive controller. To verify the result from the software, a produced plug-in hybrid electric vehicle has been used. The software outputs correspond to the determined values for the vehicle. The proposed software is a useful tool for the early phase of the plug-in hybrid electric vehicle development stage.

Keywords Plug-In Hybrid Electric System; Sizing Software; Energy Management System

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: No 17, Pardis Street, Molasadra Avenue, Vanak Square, Tehran, Iran. Postal code: 1991943344
Phone: +98 (21) 86063456
Fax: +98 (21) 84063455
taghavi@kntu.ac.ir

Article History

Received: October 29, 2018

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

CITATION LINKS

[1] Electric and hybrid cars: a history [2] ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling [3] Design optimization of a plug-in hybrid electric vehicle [4] Real-time predictive control strategy for a plug-in hybrid electric powertrain [5] Component sizing of a plug-in hybrid electric vehicle powertrain, Part A: Coupling bio-inspired techniques to meshless variable-fidelity surrogate models [6] Energy management strategy of a plug-in parallel hybrid electric vehicle using fuzzy control [7] Design and development of real-time optimal energy management system for hybrid electric vehicles [8] Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: Model development and validation [9] Modelling and simulating a hybrid electric vehicle [10] Driving the internet of things [11] Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles [12] Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles [13] Modelling of the intake manifold filling dynamics [14] Creating an initial AFR table for tuning [15] Automotive electronics handbook [16] Integrated thermal and energy management of plug-in hybrid electric vehicles [17] Road planning and design manual [18] Driveway approach & departure angles [19] An analysis of U.S. federal mileage ratings for plug-in hybrid electric vehicles [20] TOYOTA engine sensor fault affects to the engine exhaust CO and CH emissions [21] Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives [22] Fiat Asian AF40-6 manual [23] An optimal power management strategy for power split plug-in hybrid electric vehicles [24] H ∞ control applied electric torque control for regenerative braking of an electric vehicle [25] Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car [26] Instantaneous optimal regenerative braking control for a permanent-magnet synchronous motor in a four-wheel-drive electric vehicle [27] Drive cycle generation for design optimization of electric vehicles

توسعه نرم افزار هوشمند اندازه گذاری سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین

محدثه معینیان MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

امیر تقوی پور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین تکنولوژی جدید و گزینه ای مناسب به منظور کاهش حجم آلاینده ها در سطح شهر است. باتری خودروهایی که این سیستم را دارند علاوه بر شارژ از طریق موتور احتراقی و بازیابی انرژی ترمزی، می توانند به یک منبع خارجی وصل شده و شارژ شوند. این مدل خودروها مسافتی را به صورت کاملاً الکتریکی طی می کنند، به همین علت دارای باتری های نسبتاً بزرگی هستند و کمتر از موتور احتراقی استفاده می کنند و در نتیجه میزان سوخت کمتری مصرف می کنند. هدف این تحقیق طراحی روند اندازه گذاری اجزای اصلی سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین و طراحی یک کنترلر بهینه است که به صورت یک نرم افزار هوشمند ارائه شده است. در این نرم افزار اندازه موتور احتراقی، موتور الکتریکی و باتری با توجه به اطلاعات ورودی براساس نحوه عملکرد اجزا نشان داده می شود و پس از آن با استفاده از یک کنترلر پیش بین مصرف سوخت و آلاینده های منتشر شده در چرخه رانندگی شبیه سازی می شود. به منظور اطمینان از درستی عملکرد نرم افزار از اطلاعات یک نمونه خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین ساخته شده استفاده شده است که خروجی های نرم افزار با مقادیر اعلام شده برای خودرو مطابقت دارند. استفاده از این نرم افزار در مرحله اول طراحی یک خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین بسیار مفید است.

کلیدواژه ها: سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین، نرم افزار اندازه گذاری، سیستم مدیریت انرژی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

* نویسنده مسئول: taghavi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

با افزایش تعداد خودروها و مصرف سوخت های فسیلی، میزان آلودگی هوا در کلان شهرهای کشورهای مختلف به معضل مهمی در روند رو به رشد گرمایش جهانی تبدیل شده است. بسیاری از محققان و شرکت های خودروسازی با هدف بهبود کیفیت هوا به دنبال کنترل مناسب آلایندگی خودروهای احتراقی یا جایگزینی آن ها با خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین (Plug-in Hybrid Electric Vehicles; PHEVs) می باشند.

خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین دارای موتور احتراق داخلی، موتور الکتریکی و یک باتری می باشند که علاوه بر امکان شارژ باتری به کمک موتور احتراقی امکان شارژ توسط برق شهر نیز وجود دارد. در نتیجه وابستگی خودرو به سوخت فسیلی کاهش می یابد و انرژی مورد نیاز برای حرکت در مسافت های طولانی تأمین می گردد. این خودروها دارای دو حالت حرکتی، الکتریکی و هیبریدی هستند. در حالت الکتریکی موتور احتراقی خاموش شده و تأمین انرژی به عهده باتری است. در این حالت به دلیل طی کردن مسافت به صورت کاملاً الکتریکی، باتری های بزرگتری نسبت به خودروهای هیبریدی نیاز است. در حالت هیبریدی موتور احتراقی نیز روشن شده و نیازهای راننده تأمین می گردد. اصلی ترین ساختارهای خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین، ساختارهای سری، موازی و سری- موازی می باشند. مطالعات صورت گرفته حاکی از آن است که بیشترین کاهش مصرف سوخت، کمترین محدودیت، بازدهی بالا و مهم تر از

همه مورد قبول عامه مردم قرارگرفتن، در حال حاضر توسط خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین میسر گردیده است [1].

در سال های متفاوت تعداد زیادی ابزار و پیک مدل سازی و شبیه سازی سیستم محرکه خودرو طراحی شده است. در سال ۱۹۹۴ نرم افزار شبیه ساز پیشرفته خودرو به نام ADVISOR بر پایه نرم افزار متلب/سیمولینک توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر (NREL) معرفی شد. این نرم افزار مصرف سوخت، نحوه عملکرد و آلایندگی منتشرشده خودروهایی که از چند منبع انرژی استفاده می کنند را محاسبه می کند. در این نرم افزار می توان ساختار سیستم محرکه (هیبرید سری یا موازی) و اجزاء مورد نظر را انتخاب کرد و اندازه هر جزء (مانند مقدار بیشترین توان) را تغییر داد. سپس در قسمت شبیه سازی چرخه رانندگی مورد نظر انتخاب می گردد و پس از اجرای برنامه مقادیر خروجی نمایش داده می شود [2].

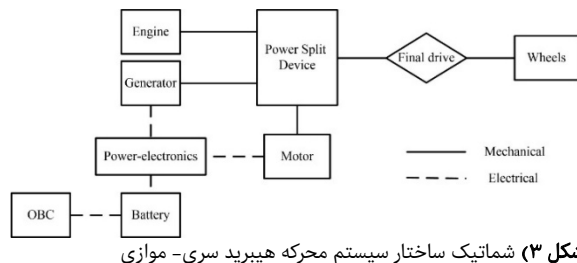
در سال ۲۰۰۴ یک نرم افزار پیچیده تر توسط آزمایشگاه ملی آرگون (ANL) به نام جعبه ابزار تجزیه و تحلیل سیستم محرکه (PSAT) معرفی شد. در این نرم افزار علاوه بر ساختار بنزینی، الکتریکی، هیبرید سری و موازی می توان ساختار هیبرید سری- موازی را انتخاب کرد. این نرم افزار از ADVISOR دقیق تر بوده و زمان شبیه سازی طولانی تر می باشد [3].

در سال ۲۰۱۱ یک نرم افزار مدل سازی و شبیه سازی پیچیده تر با امکانات بیشتر به نام Autonomie که نسخه پیشرفته PSAT بود معرفی شد. در این نرم افزار از داده های تست وسایل نقلیه و اجزاء استفاده می شود. به همین دلیل نرم افزاری معتبر می باشد و خروجی ها قابل اعتماد هستند [4]. در سال ۲۰۱۳، چهره ساز با هدف بهینه سازی اندازه اجزاء خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین تویوتا پریوس با ساختار سری- موازی به منظور کاهش مصرف سوخت، از نرم افزار Autonomie به عنوان یک ابزار شبیه سازی و از الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه سازی استفاده کرد [5].

مدل اجزاء و وسایل نقلیه که در ابزارهای مدل سازی و شبیه سازی وجود دارند اغلب توسط تولیدکنندگان ارائه شده اند و شبیه سازی و استراتژی های کنترلی مطابق آزمایش های تجربی می باشند. در هیچ نرم افزاری با توجه به پارامترهای درخواستی کاربر در مورد خودرو و شرایط رانندگی، اجزاء اصلی اندازه گذاری نمی شوند و سیستم مدیریت انرژی بهینه ای تعریف نشده است. به این منظور مطالعات زیادی با هدف بهبود مدیریت انرژی PHEV ها نیز صورت گرفته است. مینگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک استراتژی مدیریت انرژی با استفاده از کنترل فازی را روی یک وسیله نقلیه هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موازی در سه چرخه رانندگی متفاوت شبیه سازی کردند و نشان دادند که با این استراتژی کنترلی نرخ کاهش سطح شارژ باتری و مصرف سوخت کمتر می باشد [6]. در همان سال روحی و همکاران یک استراتژی مدیریت انرژی بر اساس مدل کنترل پیش بین غیرخطی پیشنهاد داد که این روش کنترلی در کاهش مصرف سوخت بسیار تأثیرگذار می باشد [7].

فیوری و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل کوچک مصرف سوخت و انرژی را برای ساختار سری هیبرید الکتریکی پلاگین ایجاد کردند که در هر لحظه مصرف سوخت محاسبه می گردد. پارامترهای ورودی این مدل سازی سرعت و شتاب لحظه ای خودرو و شیب جاده می باشد [8]. هدف از انجام این تحقیق، طراحی سیستم انتقال قدرت هیبرید الکتریکی پلاگین خودروهای سواری شهری برای ساختار سری، موازی و سری- موازی می باشد. به این منظور یک نرم افزار هوشمند بر پایه متلب طراحی شده است. ورودی آن اطلاعات خودرو، نوع ساختار هیبریدی و چرخه رانندگی بوده و بر این اساس مشخصات

این ساختار موتور الکتریکی، ژنراتور و موتور احتراقی از طریق چرخ‌دنده سیاره‌ای مطابق شکل ۳ به یکدیگر متصل می‌شوند^[9]. از میان ساختارهای پلاگین، سیستم محرکه هیبرید سری- موازی بهترین حالت مصرف سوخت برای رانندگی شهری را در مقایسه با ساختار سری و موازی دارد. همچنین در شرایط رانندگی در بزرگراه ساختار سری- موازی و موازی در مقایسه با ساختار سری بازدهی بالاتری دارند^[9].



شکل (۳) شماتیک ساختار سیستم محرکه هیبرید سری- موازی

۳- اجزاء سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین

با توجه به ساختارهای معرفی‌شده اصلی‌ترین اجزاء سیستم محرکه هیبرید الکتریکی در ادامه معرفی می‌گردند.

۳-۳- موتور الکتریکی

ماشین الکتریکی که در سیستم انتقال قدرت خودرو در دو حالت هیبریدی و الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ماشین همگن مغناطیس دائم (Permanent Magnet Synchronous Machine; PMSM) می‌باشد که در حالت عملکرد موتوری، انرژی الکتریکی به عنوان ورودی موتور و انرژی مکانیکی، خروجی موتور می‌باشد. در صورتی که جریان انرژی برعکس باشد، این ماشین در حالت ژنراتوری عمل می‌کند. این نوع ماشین نسبت توان به وزن و گشتاور بالایی دارد و به خاطر بازدهی بالا (تا ۹۶ درصد)، به عنوان گزینه‌ای مطلوب برای استفاده در وسایل نقلیه مطرح شده است^[10].

۳-۴- پک باتری

باتری به عنوان منبع توان برای موتور الکتریکی و ذخیره‌کننده انرژی ترمزی به صورت الکتریکی، مهم‌ترین بخش سیستم هیبریدی می‌باشد. ظرفیت باتری با توجه به میزان عملکرد خودرو در حالت الکتریکی مشخص می‌گردد.

محدوده عملکرد باتری در حالت شارژ (SOC) محدود می‌باشد. در حقیقت همه انرژی ذخیره‌شده در باتری نمی‌تواند برای تولید توان کافی برای سیستم رانش استفاده شود. زیرا در باتری‌ها حالت شارژ پایین، توان خروجی آن‌ها را محدود کرده و هم‌زمان به دلیل افزایش مقاومت داخلی، بازده کم می‌شود. بنابراین بخشی از انرژی باتری بین حالت شارژ بالا و حالت شارژ پایین باتری در دسترس می‌باشد^[11]. همچنین با گذشت زمان، باتری تخریب می‌شود و ظرفیت باتری کاهش می‌یابد. در نتیجه برای داشتن ظرفیت قابل استفاده کافی در پایان عمر، پک باتری باید بزرگ باشد^[12].

باتری لیتیوم- یون به عنوان گزینه اصلی برای خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین مطرح می‌گردد؛ زیرا دارای نسبت توان به وزن بالا، ظرفیت بالا، شارژ سریع و چرخه عمر طولانی می‌باشد. همچنین توسعه لیتیوم- یون ادامه دارد و قیمت تولید در حال کاهش است^[9].

۱-۳- موتور احتراق داخلی

در طراحی خودروهای هیبرید الکتریکی بیشتر موتورهای بنزینی همراه موتورهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موتورهای بنزینی در مقایسه با موتورهای دیزلی دارای نسبت توان به وزن بالاتر و محدوده سرعت بیشتری می‌باشند و از نظر آلایندگی پاک‌تر

اجزاء مورد نیاز، میزان مصرف سوخت و آلایندگی، نحوه تخلیه شارژ باتری، نقاط عملکرد موتور احتراقی و موتور الکتریکی، نقشه‌های آلایندگی و مصرف سوخت موتور احتراقی نمایش داده می‌شود. تاکنون هیچ نرم‌افزاری که اندازه‌گذاری اجزاء، اجرای یک استراتژی کنترلی بهینه و شبیه‌سازی مصرف انرژی و آلاینده‌های منتشرشده را به صورت هم‌زمان برای خودروهای سواری انجام دهد، معرفی نشده است.

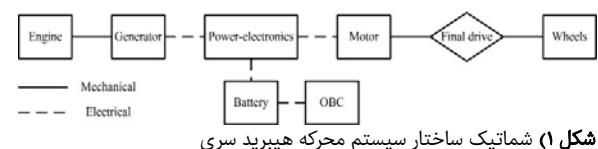
در ابتدا پس از معرفی ساختارهای مختلف و اجزاء اصلی سیستم محرکه به مدل‌سازی و روند اندازه‌گذاری اجزاء پرداخته شده است.

۲- ساختارهای سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین

مهم‌ترین پارامتر اندازه‌گذاری اجزاء سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین، نحوه ارتباط اجزاء با یکدیگر می‌باشد که ساختارهای متفاوتی ایجاد می‌گردد که عبارتند از: ساختار سری، ساختار موازی و ساختار سری- موازی.

۲-۱- سیستم محرکه هیبرید سری

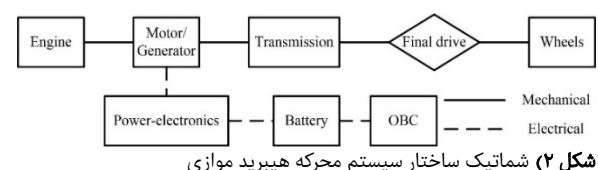
سیستم محرکه هیبرید سری مشابه ساختار خودروهای الکتریکی می‌باشد. با این تفاوت که یک موتور احتراقی به منظور افزایش دامنه حرکت خودرو به یک ژنراتور مطابق شکل ۱ متصل شده و توان الکتریکی اضافی را به موتور الکتریکی انتقال می‌دهد یا باتری شارژ می‌گردد. از آنجایی که موتور احتراقی به صورت مکانیکی و مستقیم به شفت چرخ‌ها متصل نیست، می‌توان سرعت و توان موتور را در حالت بهینه تنظیم کرد و به همین علت سیستم کنترل توان در هیبرید سری نسبت به انواع دیگر خودروهای هیبریدی ساده می‌باشد. با این حال، به علت تبدیل توان خروجی موتور به انرژی الکتریکی، اتلاف انرژی در این ساختار قابل توجه است^[9]. ساختار سری با برد افزونه (Extended Range) یک نمونه از ساختار سری می‌باشد که در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۱) شماتیک ساختار سیستم محرکه هیبرید سری

۲-۲- سیستم محرکه هیبرید موازی

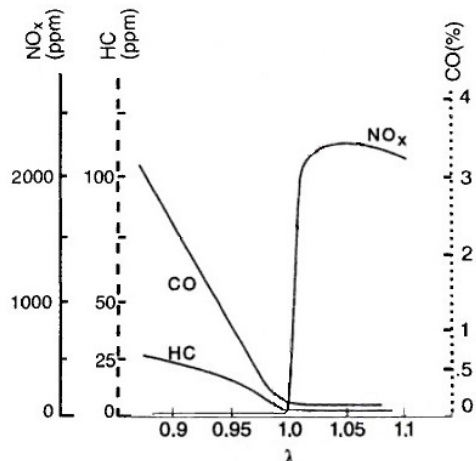
در سیستم محرکه هیبرید موازی موتور احتراقی و موتور الکتریکی مطابق شکل ۲ از طریق جعبه‌دنده به صورت مکانیکی و مستقیم به شفت چرخ‌ها متصل می‌باشند و وجود یک کلاچ باعث می‌شود تا موتور احتراقی از سیستم جدا شده و سیستم به صورت کاملاً الکتریکی عمل کند. به طور معمول در این ساختار یک موتور/ژنراتور الکتریکی وجود دارد و سهم عملکرد آن بستگی به اندازه آن دارد. همچنین ممکن است یک موتور/ژنراتور الکتریکی کوچک برای شروع کار موتور احتراقی یا بازیابی انرژی ترمزی استفاده گردد^[9].



شکل (۲) شماتیک ساختار سیستم محرکه هیبرید موازی

۲-۳- سیستم محرکه هیبرید سری- موازی

این ساختار، ترکیبی از ساختارهای سری و موازی می‌باشد که بهترین حالت را ارائه می‌دهد و طراحی پیچیده‌ای دارد. معمولاً در



نمودار ۲) غلظت آلاینده‌ها برحسب نسبت هوا به سوخت معادل بعد از کاتالیست [15]

۳-۲- جعبه‌دنده

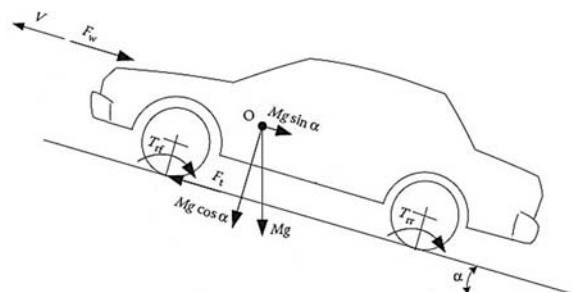
یکی از تأثیرگذارترین اجزاء در مصرف سوخت و میزان آلودگی خودرو در ساختار موازی سیستم‌های انتقال قدرت هیبرید الکتریکی پلاگین، جعبه‌دنده می‌باشد. در حقیقت با انتخاب یک نسبت دنده مناسب در هر لحظه، موتور احتراقی می‌تواند در حالت بهینه خود عمل کند. در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین از جعبه‌دنده‌هایی که دارای ساختاری ساده و بازدهی بالا هستند، استفاده می‌شود.

۴- مدل‌سازی سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین

به منظور طراحی ساختارهای سیستم محرکه، ابتدا اجزاء اصلی سیستم مدل‌سازی می‌شوند. این تحقیق بر پایه مدل‌سازی شبه استاتیکی انجام گرفته است. در این روش شبیه‌سازی یک چرخه رانندگی به تعداد زیادی بازه‌های زمانی تقسیم می‌گردد که در هر بازه سرعت، شتاب و هر پارامتر موثری ثابت در نظر گرفته می‌شود. این بازه‌های زمانی باید به اندازه‌ای کوچک باشند که فرض شبه استاتیکی برآورده شود. این روش یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل استراتژی کنترلی سیستم‌های محرکه پیچیده می‌باشد و به علت اینکه اندازه‌گذاری اجزاء اصلی هدف می‌باشد، این روش مبنای مدل‌سازی قرار گرفته است [16].

۴-۱- مدل دینامیک خودرو

با توجه به اهداف شبیه‌سازی می‌توان از رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی دینامیک خودرو استفاده کرد. شکل ۴ نیروهای وارد بر خودرویی که روی شیب حرکت می‌کند را نشان می‌دهد.



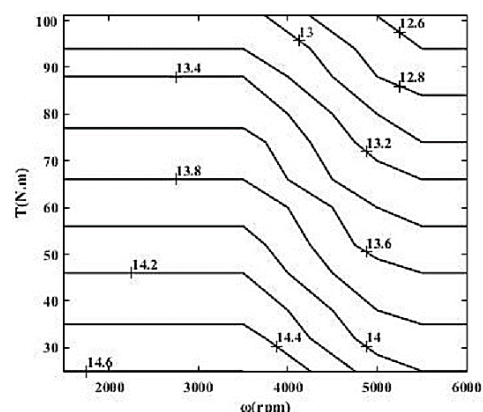
شکل ۴) نیروهای وارد بر خودرو حین رانندگی روی شیب [11]

نیروی کشنده F_t در سطح تماس بین چرخ‌های محرک و سطح جاده، خودرو را به سمت جلو می‌راند. هنگامی که خودرو حرکت می‌کند، نیروهای مقاومی خلاف جهت حرکت خودرو به آن وارد می‌شود که

می‌باشند. در این تحقیق موتورهای بنزینی تنفس طبیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در حالت احتراق، هوا را با فشار اتمسفر مکش می‌کنند [13].

به طور کلی، هر موتور یک ناحیه عملکرد مطلوب دارد که در آن مصرف سوخت حداقل می‌شود. نقشه مصرف سوخت ویژه ترمزی، این ناحیه را به ما نشان می‌دهد. مشخصه مصرف سوخت ویژه ترمزی (Brake Specific Fuel Consumption; BSFC) معمولاً در دستگاه SI به صورت مقدار گرم سوخت مصرف شده در هر کیلووات توان خروجی در هر ساعت (g/kWh) اندازه گرفته می‌شود. با استفاده از موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت می‌توان موتور احتراقی را به گونه‌ای کنترل کرد که در حالت بهینه کار کند [11].

از عوامل مؤثر بر بازده و انتشار آلاینده یک موتور، زمان جرقه‌زنی، نسبت هوا به سوخت در مخلوط سوخت و هوا، دمای احتراق و دمای کاتالیست می‌باشد. در این تحقیق با فرض زمان‌بندی صحیح جرقه در موتور و به اندازه گرم شدن کاتالیست، اثر پارامتر نسبت هوا به سوخت بر آلاینده‌های موتور بنزینی مورد توجه قرار گرفته است. کنترلر MicroSquirt کنترل‌کننده تزریق سوخت در موتور می‌باشد و یکی از محبوب‌ترین محصولات MegaSquirt است. از جمله اطلاعات مورد نیاز این کنترلر نسبت هوا به سوخت می‌باشد که برای موتورهای احتراقی در هر دور و گشتاوری، متفاوت است. نسبت هوا به سوخت هر موتور از سایت کنترلر MicroSquirt به دست آمده است [14]. به طور مثال نمودار نسبت هوا به سوخت موتور احتراقی خودروی تویوتا پریوس (Toyota Prius) هیبرید الکتریکی پلاگین مطابق نمودار ۱ می‌باشد.



نمودار ۱) نقشه نسبت هوا به سوخت موتور احتراقی پریوس

سوختن سوخت‌های هیدروکربنی در موتورهای احتراقی هرگز ایده‌آل نیست. فرآورده‌های احتراق علاوه بر آب و دی‌اکسید کربن، شامل مقدار مشخصی از اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته بوده که همگی برای انسان مسمومیت‌زا هستند [11]. انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) توسط وسایل نقلیه، نقش موثری در افزایش دمای کره زمین دارد. در این تحقیق از طریق مصرف سوخت میزان CO_2 منتشرشده سیستم طراحی‌شده در نرم‌افزار محاسبه گردید.

یکی از اجزاء تأثیرگذار در بهبود وضعیت آلودگی، کاتالیست می‌باشد که حتی در خودروهای هیبریدی هم مورد استفاده قرار می‌گیرد [15]. در این تحقیق با استفاده از نمودار ۲ میزان انتشار بقیه آلاینده‌ها محاسبه می‌گردد که برای خودروهای پلاگین تقریباً صفر می‌باشد.

بیشترین شیب جاده با توجه به سرعت خودرو مطابق دستورالعمل طراحی جاده که در سال ۲۰۰۲ توسط دولت استرالیا منتشر شد، در نظر گرفته شده است که در جدول ۱ آورده شده است [17].

جدول ۱) حداکثر شیب مجاز جاده (%) [17]

سرعت خودرو (km/h)	هموار	ناهموار	نوع زمین
۵۰	۶-۸	۸-۱۰	۱۰-۱۲
۶۰	۶-۸	۷-۹	۹-۱۰
۸۰	۴-۶	۵-۷	۷-۹
۱۰۰	۴	۴-۶	۶
۱۲۰	۳	۳-۵	-

۲-۴- مدل موتور الکتریکی

انتخاب موتور الکتریکی بر اساس بیشترین توان درخواستی راننده می‌باشد. در حالت ساختار سری و سری- موازی موتور الکتریکی باید بتواند بدون کمک موتور احتراقی، توان کافی را برای عملکرد مناسب خودرو تأمین کند. به این منظور مطابق رابطه (۸) بیشترین توان به‌دست‌آمده از توان حداکثر سرعت خودرو، توان شتاب‌گیری و توان چرخه رانندگی مبنای انتخاب موتور قرار می‌گیرد.

$$P_{eMotor-series, PowerSplit} = \max(P_{Vmax}, P_{acc}, P_{cycle}) / \eta_m \times \eta_{loss} \quad (8)$$

که η_m بازده مکانیکی موتور الکتریکی و η_{loss} بازدهی برای اتلاف انرژی فرض شده است.

در حالت ساختار موازی موتور الکتریکی باید بتواند توان حداکثر سرعت خودرو در حالت الکتریکی (رابطه ۹) و توان شیب‌روی با حداکثر زاویه جاده را بدون کمک موتور احتراقی مطابق رابطه (۱۰) تأمین کند.

$$P_{Vmax} = \frac{V_{emax}}{1000} (f_r M g + 0.5 \rho A_f C_D V_{emax}^2) \quad (9)$$

که V_{emax} بیشترین سرعت خودرو در حالت الکتریکی برحسب متر بر ثانیه می‌باشد.

$$P_{eMotor-parallel} = \max(P_{Vmax}, P_{grade, max}) / \eta_m \times \eta_{loss} \quad (10)$$

بیشترین زاویه جاده مجاز اعلام شده ۱۶/۴ درجه می‌باشد [18]. با فرض خاموش بودن موتور احتراقی، موتور الکتریکی بایستی توان مورد نیاز را تأمین کند. سرعت مورد نظر برای پیمایش این شیب کمتر از حداقل سرعت کاری موتور احتراقی در نظر گرفته شده است. در ساختار موازی به علت اینکه موتور الکتریکی و موتور احتراقی می‌توانند به صورت هم‌زمان توان درخواستی راننده را تأمین کنند، بایستی در پایان اندازه‌گذاری بررسی گردد که آیا توان این دو جزء پاسخگوی توان شتاب‌گیری مورد نظر کاربر می‌باشد یا خیر.

۳-۴- مدل باتری

مهم‌ترین خصوصیت باتری هنگام اندازه‌گذاری، ظرفیت انرژی باتری می‌باشد که به تغییرات انرژی باتری و محدوده کار حالت شارژ باتری وابسته است.

به منظور تعیین تغییرات انرژی باتری، باید تغییرات انرژی درخواستی راننده طی کل مسیر حرکتی مشخص گردد که از طریق رابطه (۱۱) به دست می‌آید [11].

$$\Delta E = \int_0^T P_{cycle} dt \quad (11)$$

که P_{cycle} توان‌های مثبت به‌دست‌آمده از چرخه رانندگی در نظر گرفته می‌شود و T زمان کلی سفر می‌باشد که با توجه به مسافت و چرخه رانندگی مشخص شده به دست می‌آید.

شامل نیروی مقاوم غلتشی (گشتاور T_{rf} و T_{rr} روی چرخ‌ها)، نیروی مقاوم آیرودینامیکی (F_w) و نیروی وزن به خاطر شیب‌روی ($Mg \sin \alpha$) می‌باشد [11].

طبق قانون دوم نیوتن شتاب خودرو را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_R}{\delta M} \quad (1)$$

V سرعت خودرو برحسب متر بر ثانیه، $\frac{dV}{dt}$ شتاب خودرو برحسب متر بر مجذور ثانیه، $\sum F_t$ نیروی کل کشنده، $\sum F_R$ کل نیروهای مقاوم برحسب نیوتن، M جرم کل خودرو برحسب کیلوگرم و δ ضریب جرم است که در واقع اثر اجزاء چرخان در سیستم رانش بر جرم خودرو را نشان می‌دهد [11].

در نهایت نیروی کل کشنده از رابطه (۲) به دست می‌آید [11].

$$F_t = \delta M \frac{dV}{dt} + f_r M g \cos \alpha + 0.5 \rho A_f C_D (V - V_w)^2 + Mg \sin \alpha \quad (2)$$

جمله $f_r M g \cos \alpha$ نیروی مقاوم غلتشی است که در آن f_r ضریب مقاوم غلتشی و g شتاب ثقل می‌باشد. جمله $0.5 \rho A_f C_D (V - V_w)^2$ نیروی مقاوم آیرودینامیکی است که در آن ρ چگالی جرمی هوا، A_f مساحت سطح جلویی خودرو، C_D ضریب درگ و V_w سرعت هوا می‌باشد که سرعت هوا صفر در نظر گرفته شده است.

توان مورد نیاز خودرو در حین رانندگی برحسب کیلووات از حاصل ضرب نیرو در سرعت مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید [11].

$$P_{cycle} = \frac{V}{1000} \left(\delta M \frac{dV}{dt} + f_r M g \cos \alpha + 0.5 \rho A_f C_D V^2 + Mg \sin \alpha \right) \quad (3)$$

هدف اصلی، تأمین این توان از طریق باتری یا موتور احتراقی می‌باشد. با این حال طی شرایط مختلف ممکن است توان درخواستی راننده متفاوت از توان به‌دست‌آمده برای چرخه رانندگی باشد. در نتیجه مهم‌ترین پارامترهای قابلیت رانندگی مانند حداکثر سرعت خودرو، شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی نیز مبنای اندازه‌گذاری قرار می‌گیرند.

حداکثر سرعت خودرو، سرعت ثابت حرکت خودرو با تمام توان در جاده مسطح می‌باشد. در این تحقیق این پارامتر توسط کاربر تعیین می‌گردد و طبق رابطه (۴) توان به دست می‌آید [11].

$$P_{Vmax} = \frac{V_{max}}{1000} (f_r M g + 0.5 \rho A_f C_D V_{max}^2) \quad (4)$$

عملکرد شتاب‌گیری، مدت زمان شتاب‌گیری (t_a برحسب ثانیه) خودرو از سرعت صفر تا سرعت معین بالایی (V_f , ۱۰۰ km/h) روی جاده مسطح توصیف می‌شود. توان مورد نیاز در این حالت از رابطه (۵) به دست می‌آید [11].

$$P_{acc} = \frac{1}{1000} \left(\frac{\delta M}{2 t_a} V_f^2 + \frac{2}{3} f_r M g V_f + \frac{1}{5} \rho A_f C_D V_f^3 \right) \quad (5)$$

توان لازم برای حداکثر شیبی که خودرو می‌تواند با سرعت ثابت طی کند، از رابطه (۶) به دست می‌آید [11].

$$P_{grade} = \frac{V}{1000} (Mg(f_r + i) + 0.5 \rho A_f C_D V^2) \quad (6)$$

V سرعت ثابتی می‌باشد که خودرو در شیب دارد.

معمولاً شیب به صورت درصد بیان می‌گردد که با حرف i نمایش داده می‌شود که طبق رابطه (۷) داریم:

$$i(\%) / 100 = \tan \alpha = \sin \alpha \quad (7)$$

$$BSFC \left(\frac{g}{kWh} \right) = \frac{3600 \times \eta_{th} \cdot \eta_v \cdot \rho_{a,i} \left(\frac{g}{m^3} \right)}{\left(\frac{2\pi N_R T(Nm)}{V_d(dm^3)} \right) \cdot AFR} \quad (18)$$

که در آن η_{th} بازده حرارتی، η_v بازده حجمی موتور، $\rho_{a,i}$ چگالی هوای ورودی، N_R تعداد دوران میل‌لنگ در هر سیلندر به ازای هر مرحله از تولید توان، T گشتاور موتور، V_d حجم جابجایی موتور و AFR نسبت هوا به سوخت می‌باشد.

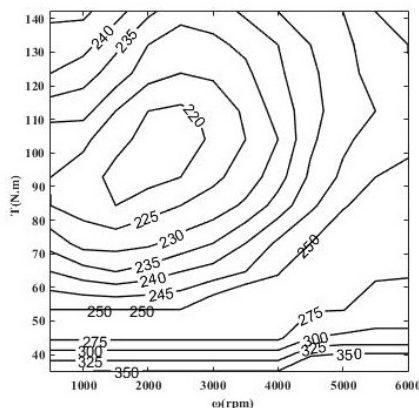
در نهایت با استفاده از گشتاور و دور موتور در هر لحظه که وابسته به شرایط رانندگی و نحوه کنترل سیستم می‌باشد، مقدار $BSFC$ و غلظت آلاینده‌ها در هر لحظه از روی نقشه $BSFC$ و آلاینده‌گی موتور احتراقی به دست می‌آید.

با هدف به‌دست‌آوردن مصرف سوخت برحسب لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر از توان موتور احتراقی و مقدار $BSFC$ در هر لحظه مطابق رابطه (۱۹) استفاده می‌شود [11].

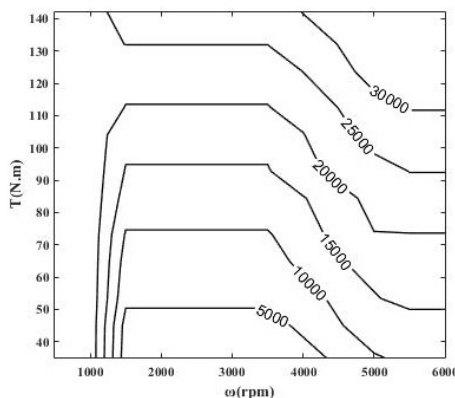
$$m \left(\frac{L}{100km} \right) = \left[\sum_{i=0}^T \left(\frac{P_{engine,i}(kW) \times BSFC_i \left(\frac{g}{kWh} \right)}{\gamma_f \left(\frac{g}{cm^3} \right)} \right) \right] \times 1s \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{0.001L}{1cm^3} \times \frac{100}{X} \quad (19)$$

γ_f چگالی بنزین برابر با $0.719 \frac{g}{cm^3}$ و X زمان و مسافت کلی سفر می‌باشد.

نمودار ۳ نمونه نقشه $BSFC$ و نمودارهای ۴، ۵ و ۶ نقشه آلاینده‌های شبیه‌سازی شده موتور احتراقی خودروی تویوتای پریوس پلاگین را نشان می‌دهند که نقشه $BSFC$ به‌دست‌آمده مطابق با نقشه $BSFC$ ارائه شده برای موتور احتراقی این خودرو می‌باشد.



نمودار ۳) نقشه $BSFC$ موتور احتراقی پریوس (g/kWh)



نمودار ۴) نقشه CO منتشرشده بعد از کاتالیست (ppm)

همان‌طور که اشاره شد بخشی از ظرفیت باتری بین حالت شارژ بالا و حالت شارژ پایین در دسترس می‌باشد. در نهایت ظرفیت انرژی باتری طبق رابطه (۱۲) به دست می‌آید [11].

$$E_{bat}(kWh) = \frac{\Delta E}{SOC_{high} - SOC_{low}} \quad (12)$$

SOC_{high} حالت شارژ بالا و SOC_{low} حالت شارژ پایین باتری می‌باشد. طبق رابطه (۱۳) توان باتری باید بزرگ‌تر از توان ورودی موتور الکتریکی باشد.

$$P_{bat} \geq \frac{P_{eMotor}}{\eta_m \times \eta_{loss}} \quad (13)$$

که η_m بازده مکانیکی موتور الکتریکی و η_{loss} بازدهی برای انرژی تلف‌شده و توان اضافی که باتری باید برای برق اجزاء خودرو تأمین کند، می‌باشد.

به دلیل اینکه خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین مصرف سوخت پایینی دارند و بیشتر تأمین انرژی به عهده باتری می‌باشد، مصرف انرژی با واحد MPGe بیان می‌گردد. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده مقدار انرژی که یک باتری با ظرفیت ۳۳/۷ kWh در ۱۰۰ مایل تأمین می‌کند را برابر با مقدار انرژی یک گالون بنزین برای طی کردن این مسیر اعلام کرده است [19]. مقدار MPGe مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$MPGe = \frac{33.7 x_e(mile)}{E_{bat}(kWh)} \quad (14)$$

x_e مسافت الکتریکی طی‌شده برحسب مایل می‌باشد.

۴-۲- مدل موتور احتراقی

مهم‌ترین پارامتر عملکرد موتور، حداکثر توان مجاز می‌باشد که نحوه تعیین این توان با توجه به ساختار هیبرید متفاوت است. به صورتی که در حالت ساختار سری یک ژنراتور با هدف شارژ باتری روی شاسی نصب می‌گردد که توسط موتور احتراقی به حرکت در می‌آید. در این صورت توان شیب‌روی با حداکثر زاویه جاده مبنای اندازه‌گذاری ژنراتور قرار می‌گیرد و با در نظر گرفتن یک بازده برای اتلاف، توان موتور احتراقی مطابق رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$P_{engine-series} = P_{grade,max} / \eta_{loss} \quad (15)$$

در حالت ساختار موازی موتور احتراقی باید بتواند بدون کمک باتری، توان کافی را برای عملکرد مناسب خودرو تأمین کند. در نتیجه مطابق رابطه (۱۶) بیشترین توان به‌دست‌آمده از توان حداکثر سرعت خودرو و توان شیب‌پیمایی مبنای انتخاب موتور قرار می‌گیرد.

$$P_{engine-parallel, PowerSplit} = \max(P_{Vmax}, P_{grade}) / \eta_{loss} \quad (16)$$

در η_{loss} ساختار موازی به‌منظور جبران انرژی تلف‌شده از موتور احتراقی تا سر چرخ به‌دلیل وجود جعبه‌دنده برابر با ۹۵ درصد فرض شده است.

برای اندازه‌گذاری موتور احتراقی در حالت سری- موازی باید به نقش موتور توجه داشت که بیشتر شبیه ساختار موازی می‌باشد در نتیجه توان موتور در این حالت از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

همان‌طور که در قسمت توان موتور الکتریکی اشاره شد، در ساختار موازی موتور الکتریکی و موتور احتراقی بایستی با هم بتوانند توان شتاب‌گیری را تأمین کنند. در نتیجه پس از اندازه‌گذاری، این موضوع مطابق رابطه (۱۷) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$P_{acc} \leq P_{engine-Parallel} + P_{eMotor-Parallel} \quad (17)$$

همان‌طور که اشاره شد به‌منظور به‌دست‌آوردن مصرف سوخت خودرو نیاز به نقشه $BSFC$ می‌باشد که این نقشه مطابق رابطه (۱۸) برای هر موتور محاسبه می‌گردد [11]. زیرا این نقشه در دسترس نمی‌باشد در نتیجه بایستی از تقریب و مدل‌سازی استفاده شود.

با توجه به خصوصیات بنزین، ۸۷ درصد بنزین از کربن تشکیل شده است. با انجام یک سری محاسبات می‌توان به رابطه (۲۰) برای میزان CO_2 منتشرشده با توجه به مقدار سوخت دست یافت [20].

$$\text{emission } CO_2 \left(\frac{g}{km} \right) = \frac{m}{100km} \times 2289g \text{ } CO_2 \quad (20)$$

در حقیقت یک لیتر بنزین ۲۲۸۹ گرم کربن دی اکسید منتشر خواهد کرد.

۳-۴- مدل جعبه‌دنده

در جعبه‌دنده‌ها درصد بازبودن دریچه گاز و سرعت خودرو، دو پارامتر مؤثر برای تغییر نسبت دنده می‌باشند که معمولاً به صورت یک نمودار به نام برنامه تغییر نسبت دنده ارائه می‌شود. تحقیقات زیادی جهت مدل‌سازی بهترین برنامه صورت گرفته است. در این تحقیق مطابق نمودار ۷ یک برنامه تغییر نسبت دنده برای جعبه‌دنده ۶ سرعته، مناسب خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین در نظر گرفته شده است [21].

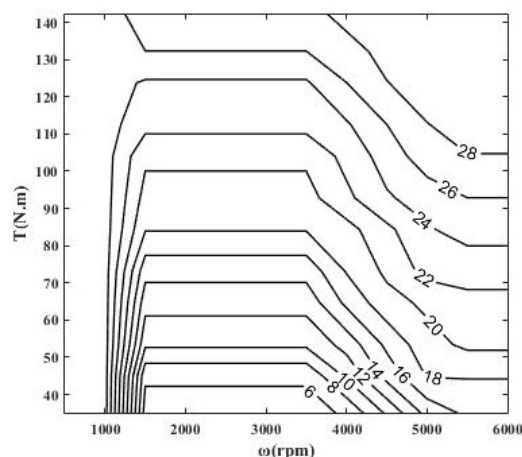
در نمودار تغییر نسبت دنده، خط چین‌ها تغییر به سمت دنده کمتر و خطوط کامل تغییر به سمت دنده بالاتر را نشان می‌دهد.

طبق نمودار ۷ در هر لحظه با توجه به سرعت خودرو شماره دنده مشخص می‌گردد و با استفاده از رابطه (۲۱) دور موتور به دست می‌آید [11].

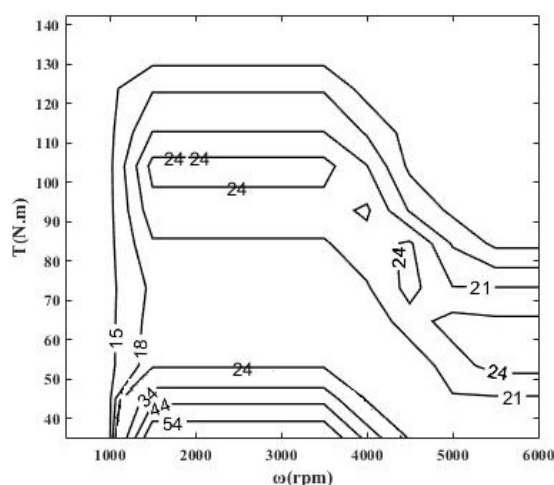
$$\omega(\text{rpm}) = \frac{30Vn_gn_i}{\pi r_w} \quad (21)$$

که ω دور موتور برحسب دور بر دقیقه، V سرعت خودرو برحسب متر بر ثانیه، n_g نسبت دیفرانسیل، n_i نسبت دنده گیربکس و r_w شعاع چرخ برحسب متر می‌باشد.

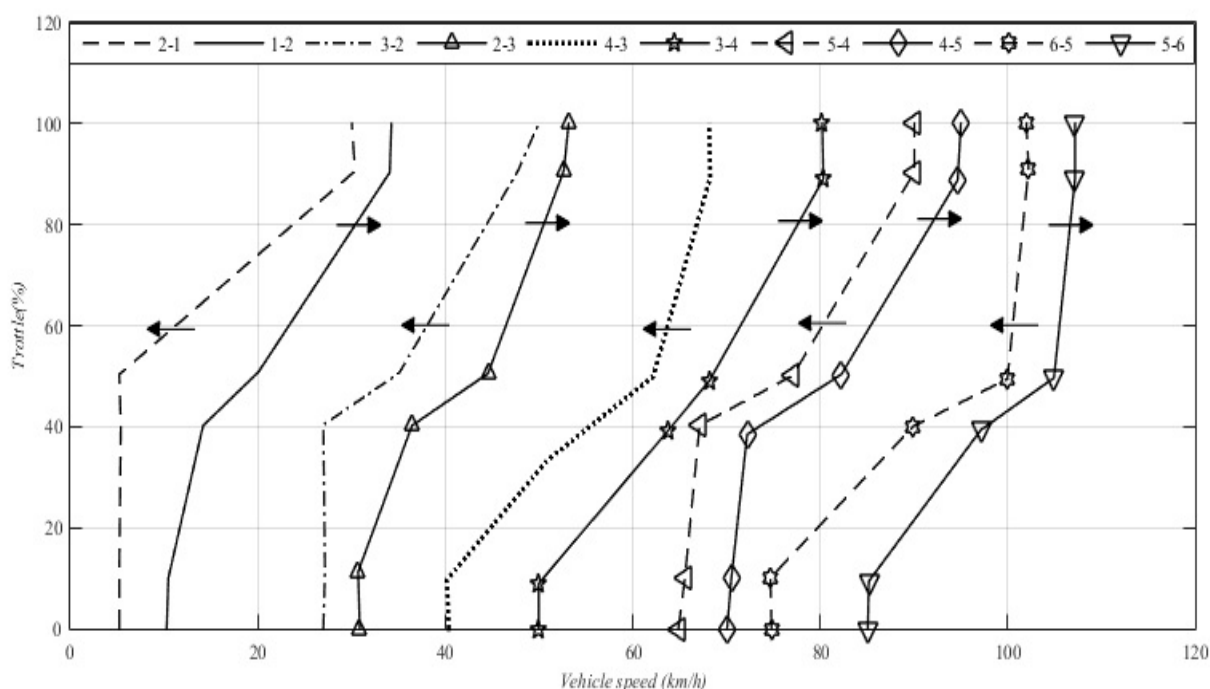
در این تحقیق یک مدل جعبه‌دنده با ۶ نسبت دنده از محصولات Aisin برای خودروهای سواری با نسبت دنده‌هایی که در جدول ۲ آورده شده است، در نظر گرفته شده است [22].



نمودار ۵) نقشه HC منتشرشده بعد از کاتالیز (ppm)



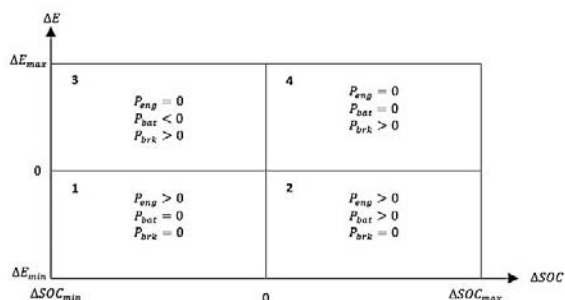
نمودار ۶) نقشه NO_x منتشرشده بعد از کاتالیز (ppm)



نمودار ۷) برنامه تغییر نسبت دنده [21]

شماره دنده	نسبت دنده
دنده یک	۴/۱۴۸
دنده دو	۲/۳۷
دنده سه	۱/۵۵۶
دنده چهار	۱/۱۵۵
دنده پنج	۰/۸۵۹
دنده شش	۰/۶۸۶
نسبت دیفرانسیل	۳/۱۸۸

بر اساس مقادیر SOC_1 ، SOC_r ، E_r و E_1 مطابق شکل ۵ ناحیه کنترلر به چهار قسمت تقسیم می‌گردد که SOC_1 و E_1 اولین مقادیر پیش‌بینی شده در هر لحظه می‌باشند.



شکل (۵) سیستم مدیریت انرژی

در ناحیه اول ΔE و ΔSOC منفی می‌باشند؛ یعنی $E_1 < E_r$ در نتیجه خودرو در حال شتاب‌گیری و $SOC_1 < SOC_r$ در نتیجه شارژ باتری از حد انتظار کمتر است و باتری نیاز به شارژ شدن دارد. در این حالت انرژی تنها توسط موتور احتراقی تأمین می‌گردد. در ناحیه دوم ΔE منفی و ΔSOC مثبت می‌باشند؛ یعنی $E_1 < E_r$ در نتیجه خودرو در حال شتاب‌گیری و $SOC_1 > SOC_r$ در نتیجه شارژ باتری از حد انتظار بیشتر است. بنابراین به منظور کاهش مصرف سوخت هم‌زمان از باتری و موتور احتراقی برای تأمین توان استفاده می‌شود. در ناحیه سوم ΔE مثبت و ΔSOC منفی می‌باشند؛ یعنی $E_1 > E_r$ در نتیجه خودرو در حال ترمزگیری و $SOC_1 < SOC_r$ در نتیجه شارژ باتری کمتر از حد انتظار است. بنابراین بخشی از انرژی ترمزگیری برای شارژ باتری استفاده می‌شود و موتور احتراقی خاموش می‌باشد. در ناحیه چهارم ΔE و ΔSOC مثبت می‌باشند؛ یعنی $E_1 > E_r$ در نتیجه خودرو در حال ترمزگیری و $SOC_1 > SOC_r$ در نتیجه شارژ باتری بیشتر از حد انتظار است، بنابراین نیاز به بازیابی انرژی ترمزگیری نبوده و موتور احتراقی نیز خاموش می‌باشد.

۲-۵ سیستم مدیریت شارژ باتری

مشخص بودن وضعیت شارژ باتری در هر لحظه بسیار اهمیت دارد و باعث انعطاف‌پذیری در سیستم مدیریت انرژی به منظور تقسیم بار بین موتور احتراقی و باتری می‌گردد. بر اساس حالت‌های عملکرد در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین دو روش مدیریت شارژ باتری وجود دارد. یک روش به نام حالت تخلیه و نگهداری شارژ (Charge Depleting-Mode) و دیگری به نام حالت مخلوط (Blended Mode) شناخته می‌شود [16].

مطابق نمودار ۸ در روش CDCS ابتدا باتری تا SOC_r تخلیه شده و خودرو به صورت کاملاً الکتریکی حرکت می‌کند و پس از آن موتور احتراقی نیز روشن شده و تأمین توان از طریق دو منبع صورت می‌گیرد و همچنین شارژ باتری در محدوده SOC_r حفظ می‌گردد اما در حالت Blended از ابتدا موتور احتراقی و باتری وظیفه تأمین توان درخواستی را به عهده دارند. در این حالت SOC_r در هر لحظه متفاوت می‌باشد.

۳-۵ بازیابی انرژی ترمزی

هنگام استفاده از ترمزها، از موتور الکتریکی به عنوان یک ژنراتور استفاده می‌شود تا انرژی ترمزی در باتری ذخیره گردد. بازیافت انرژی ترمزی یک روش مؤثر برای افزایش محدوده رانندگی می‌باشد که با توجه به روش رانندگی ۸ تا ۲۵ درصد از کل انرژی ترمزی ذخیره می‌گردد [24]. زمانی که باتری، SOC بالایی دارد یا دمای باتری زیاد

۵- کنترل سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین

وجود سیستم الکتریکی در وسایل نقلیه، انعطاف‌پذیری و پیچیدگی را برای سیستم کنترل ایجاد می‌کند که یک استراتژی مدیریت انرژی و مدیریت شارژ باتری مناسب ضمن حفظ قابلیت رانندگی، به صورت چشم‌گیر باعث کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها خواهد شد.

۵-۱ سیستم مدیریت انرژی

سیستم‌های مدیریت انرژی جریان توان منابع را با در نظر گرفتن قیود کنترل می‌کنند. استراتژی این سیستم‌ها بر اساس مدل‌سازی می‌باشد که از انواع این استراتژی‌ها می‌توان به مدل کنترل پیش‌بین (Model Predictive Control; MPC) اشاره کرد.

MPC یکی از به‌روزترین و کارآمدترین روش‌های کنترلی می‌باشد که در نرم‌افزار استفاده شده است و یک راه حل مناسب برای مسائل کنترلی بهینه دارای چند ورودی و چند خروجی می‌باشد [23]. هدف کلی طراحی MPC محاسبه مسیر ورودی‌های آینده به منظور بهینه‌سازی رفتار خروجی‌های بعدی می‌باشد. در این تحقیق از روش MPC به منظور بهینه‌سازی یک تابع هزینه درجه دوم که مطابق رابطه (۲۲) به دست آمده است، استفاده می‌شود [24].

$$J = \sum_{i=1}^{N_1} \omega_{SOCi} [SOC_r(k+i) - \widehat{SOC}(k+i|k)]^2 + \omega_{Ei} [E_r(k+i) - \widehat{E}(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_2} \omega_{engj} P_{eng}^2(k+j-1) \quad (22)$$

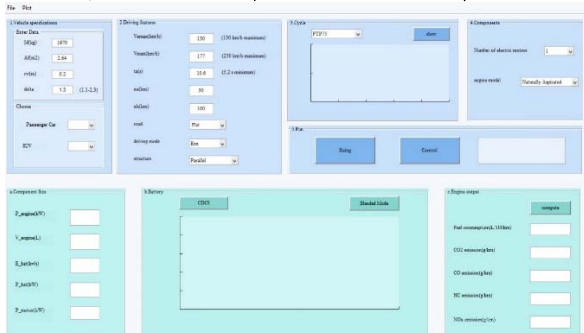
که ω_{engj} و ω_{Ei} فاکتورهای وزن تابع هزینه بوده و با آزمون و خطا به دست آمده‌اند. SOC_r وضعیت شارژ مرجع و $\widehat{SOC}$ وضعیت شارژ باتری در هر لحظه، E_r انرژی درخواستی راننده و $\widehat{E}$ انرژی پیش‌بینی تولیدشده توسط سیستم محرکه، P_{eng} توان تولیدی موتور احتراقی و N_1 و N_2 اولین و آخرین نقطه بازه زمانی مد نظر برای پیش‌بینی می‌باشد.

برای تضمین بهترین عملکرد MPC، باید برخی نکات در نظر گرفته شود. مهم‌ترین نکته این است که مدل نسبتاً دقیق و ساده وجود داشته باشد که شامل تمامی ویژگی‌های رفتار سیستم اصلی باشد. همچنین باید حالت‌های قابل اندازه‌گیری سیستم معین گردد و بقیه حالت‌ها تخمین زده شود [27]. در این تحقیق معادلات حالت مورد نیاز بر اساس مدل دینامیک طولی خودرو و مدل ساده باتری مطابق رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) به دست آمده‌اند.

$$E(k+1) - E_r = E(k) - E_r + P_{eng} + P_{bat} - P_{brk} \quad (23)$$

$$SOC(k+1) - SOC_r = SOC(k) - SOC_r - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{bat}P_{bat}(k)}}{2R_{bat}Q_{nom}} \quad (24)$$

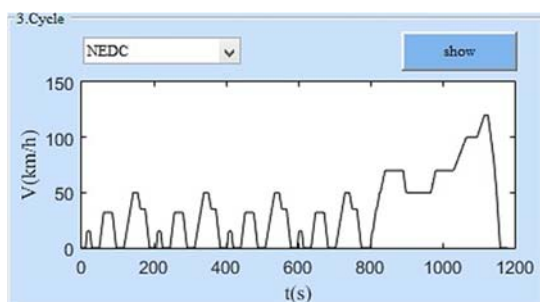
که P_{brk} و P_{bat} توان‌های تولیدی باتری و سیستم ترمزگیری مکانیکی، V_{oc} ولتاژ مدار باز باتری، R_{bat} مقاومت ثابت باتری و Q_{nom} ظرفیت نامی باتری می‌باشند.



شکل ۶ محیط نرم افزار طراحی شده

قسمت اول مربوط به ویژگی‌های خودروی سواری مانند وزن، مساحت سطح جلویی خودرو، شعاع چرخ و ضریب جرم می‌باشد. در صورت در اختیار نداشتن اطلاعات می‌توان یک مدل سواری یا SUV (Sport Utility Vehicle) پیش فرض نرم افزار را انتخاب نمود. قسمت دوم مربوط به ویژگی‌های رانندگی مانند بیشترین سرعت و مسافت درخواستی در حالت الکتریکی و هیبریدی، زمان شتاب‌گیری، شیب جاده، حالت رانندگی و ساختار مورد نظر می‌باشد. شیب جاده مربوط به محل رانندگی می‌باشد که با توجه به جدول ۱ سه حالت هموار (سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت و شیب ۳ درصد)، ناهموار (سرعت ۱۰۰ کیلومتر در ساعت و شیب ۶ درصد) و کوهستانی (سرعت ۸۰ کیلومتر در ساعت و شیب ۹ درصد) قابل انتخاب می‌باشند. حالت رانندگی، مؤثر در مصرف سوخت می‌باشد که دو حالت Eco و Sport در نظر گرفته شده است. زمانی که خودرو در حالت Eco قرار می‌گیرد، بیشترین حالت صرفه‌جویی در مصرف انرژی بر خودرو اعمال می‌شود و تعویض دنده در دوره‌های پایین اتفاق می‌افتد. حالت Sport دقیقاً نقطه مقابل حالت Eco می‌باشد. در این حالت می‌توان با حداکثر سرعت رانندگی کرد و موتور احتراقی برای حرکت‌های پرشتاب آماده می‌باشد.

قسمت سوم مربوط به نحوه رانندگی می‌باشد که با انتخاب چرخه رانندگی، مطابق شکل ۷ تا حدی نحوه رانندگی شبیه‌سازی می‌گردد.

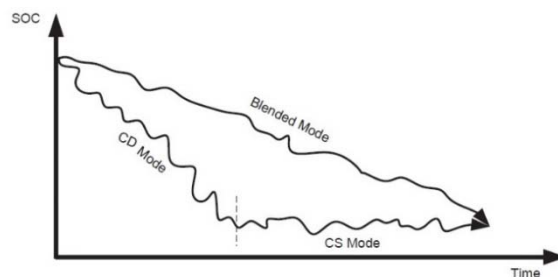


شکل ۷ انتخاب چرخه رانندگی

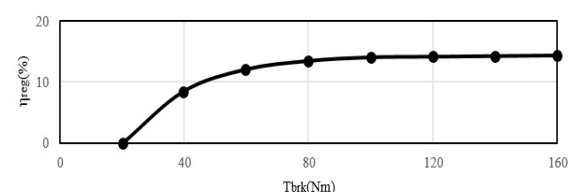
در این تحقیق ۶ چرخه رانندگی مورد نظر می‌باشند. چرخه رانندگی FTP-75 مناسب برای وسایل نقلیه سبک شهری، HWFET سناریوی رانندگی خودرو در بزرگراه، LA92 سناریو طراحی شده توسط کالیفرنیا برای وسایل نقلیه سبک، NEDC سناریو طراحی شده توسط اروپا برای وسایل نقلیه سبک، SC03 یک نمونه از رانندگی تهاجمی همراه با استفاده از تهویه هوا در خودرو و US06 به منظور نشان دادن رفتارهای رانندگی پرخطر، سرعت بالا و شتاب بالا طراحی شده‌اند [27]. قسمت چهارم مربوط به اطلاعات تکمیلی اجزاء مانند نوع موتور احتراقی و تعداد موتور الکتریکی می‌باشد. دو مدل موتور احتراقی

باشد، بازیابی انرژی ترمزی اتفاق نمی‌افتد. در این موارد سیستم ترمز معمولی خودرو گشتاور ترمزی خودرو را تأمین می‌کند. بنابراین همکاری میان ترمز بازگشتی و ترمز هیدرولیکی نیاز به طراحی یک استراتژی کنترلی دارد که به عنوان ترکیب گشتاور شناخته می‌شود [25].

به علت پیچیدگی‌های بازیابی انرژی ترمزی، در این تحقیق از یکی از راه‌های پیشنهادی در این زمینه که به دست آوردن رابطه بین بازده ترمز بازگشتی و گشتاور ترمزی مورد نیاز موتور الکتریکی می‌باشد، استفاده شده است. این رابطه در بدبینانه‌ترین حالت مطابق نمودار ۹ به دست آمده است [26].



نمودار ۸ سیستم مدیریت شارژ باتری [16]



نمودار ۹ رابطه میان بازده ترمز بازگشتی و گشتاور ترمزی مورد نیاز موتور الکتریکی [26]

مطابق نمودار ۹ وقتی گشتاور ترمزگیری از یک حدی پایین‌تر باشد، بازیابی انرژی ترمزی اتفاق نمی‌افتد زیرا با وجود بازده موتور الکتریکی و اتلافات انرژی که در مسیر ذخیره‌سازی این انرژی وجود دارد درصد کمی از این انرژی به باتری خواهد رسید و این عمل مقرون به صرفه نیست. در حقیقت بازیابی انرژی ترمزی در محدوده مشخصی از سرعت خودرو و با وجود شتاب ترمزگیری قابل قبول اتفاق می‌افتد. در این تحقیق با استفاده از این نمودار در زمان ترمزگیری درصدی از گشتاور ترمزی برای شارژ باتری استفاده می‌شود.

۶- نرم افزار هوشمند

در این تحقیق فرآیندهای معرفی شده در مورد اندازه‌گذاری و کنترل سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین به صورت یک نرم افزار در نرم افزار متلب/GUI (Graphical User Interface) به نمایش در آمده است. محیط نرم افزار طراحی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. این نرم افزار بر اساس داده‌های ورودی که توسط کاربر مشخص می‌شوند، اندازه مناسب موتور احتراقی، موتور الکتریکی و باتری را نمایش می‌دهد. سپس استراتژی کنترلی اعمال می‌گردد و بر اساس انتخاب نحوه تخلیه شارژ باتری، توان موتور احتراقی و باتری در هر لحظه مشخص می‌گردد. در نهایت بر اساس عملکرد موتور احتراقی مصرف سوخت و آلایندگی‌های منتشر شده محاسبه می‌شوند. در این نرم افزار اطلاعات ورودی به ۴ قسمت تقسیم می‌شوند که کاربر باید آن‌ها را پر کند.

شرکت آورده شده است. مشاهده می‌شود که درصد خطا در شبیه‌سازی کم می‌باشد و می‌توان از این نرم‌افزار استفاده نمود.

جدول ۵) خروجی خودروی Hyundai IONIQ

Hyundai IONIQ			
پارامترها	کاتالوگ	نرم‌افزار	درصد خطا
مصرف سوخت (l/100km)	۴	۴/۰۴	۱
CO ₂ منتشرشده (g/km)	۹۲	۹۲/۵	۰/۵
مصرف انرژی (MPGe)	۱۱۹	۱۰۹	-۸/۴

همان‌طور که اشاره شد، مصرف سوخت خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین از خودروهای بنزینی کمتر می‌باشد. در این قسمت با هدف نشان دادن این کاهش مصرف سوخت، مدل خودروی Hyundai IONIQ به صورت بنزینی شبیه‌سازی شده است. با این تفاوت که وزن کمتری (۱۵۰۰ کیلوگرم) برای این خودرو در نظر گرفته شده است و پارامترهایی مانند سرعت حداکثر و زمان شتاب‌گیری که به وزن مرتبط می‌باشند نیز متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. خروجی‌های نرم‌افزار در دو حالت بنزینی و پلاگین در جدول ۶ آورده شده است. طبق محاسبات صورت‌گرفته در صورت تبدیل یک خودروی بنزینی به یک خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین شاهد کاهش ۴۵ درصدی مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ی خودرو خواهیم بود.

جدول ۶) مقایسه خودروی بنزینی و پلاگین

Hyundai IONIQ			
پارامترها	بنزینی	پلاگین	درصد کاهش
توان موتور احتراقی (kW)	۱۲۰/۸	۷۸/۳	۳۵/۲
مصرف سوخت (l/100km)	۷/۴	۴/۰۴	۴۵/۴
CO ₂ منتشرشده (g/km)	۱۶۹	۹۲/۵	۴۵/۲

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک نرم‌افزار هوشمند اندازه‌گذاری و شبیه‌سازی سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین در محیط گرافیکی نرم‌افزار متلب طراحی شده است. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته تا به حال چنین نرم‌افزاری برای سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین ارائه نشده است.

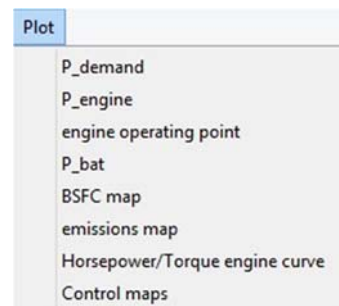
از ویژگی‌های این نرم‌افزار اندازه‌گذاری اجزاء اصلی سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین در ساختارهای مختلف هیبریدی می‌باشد. با توجه به این نکته که روند اندازه‌گذاری اجزاء سیستم محرکه هیبرید الکتریکی پلاگین در صنعت مشخص نمی‌باشد و اصولاً بر پایه آزمون‌های مختلف، اجزاء انتخاب می‌شوند، این نرم‌افزار یک گزینه مناسب برای مرحله اولیه طراحی یک خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین می‌باشد.

یکی دیگر از بخش‌های نرم‌افزار مربوط به قسمت کنترل و شبیه‌سازی می‌باشد. در قسمت کنترل از نوین‌ترین استراتژی مدیریت انرژی یعنی مدل کنترل پیش‌بین (MPC) استفاده شده است. در نهایت مقدار سوخت و انرژی مصرف‌شده و آلاینده‌های منتشرشده با توجه به نقاط کاری موتور احتراقی نمایش داده می‌شوند.

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزار از مشخصات دو مدل خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین پرترفدار استفاده شده است. مشاهده گردید که نتایج ارائه‌شده توسط نرم‌افزار تقریباً با اطلاعات به‌دست‌آمده هنگام تست این خودروها مطابقت دارد. همچنین یک مدل خودروی پلاگین با خودروی بنزینی مقایسه شده است که به خوبی مزیت خودروی پلاگین نشان داده شده است.

تنفس طبیعی و توربوشارژر قابل انتخاب می‌باشد و همچنین می‌توان یک یا دو موتور الکتریکی در ساختار داشت.

با فشردن کلید Sizing در نرم‌افزار اندازه‌توان و حجم موتور احتراقی، توان و ظرفیت باتری و توان موتور الکتریکی مورد نیاز با توجه به درخواست کاربر نشان داده می‌شود. کلید Control مربوط به سیستم مدیریت انرژی سیستم محرکه می‌باشد. همچنین دو حالت CDCS و Blended با هدف مدیریت شارژ باتری قابل انتخاب می‌باشند که نحوه تخلیه شارژ باتری نشان داده می‌شود. در نهایت با فشردن کلید Compute میزان مصرف سوخت و آلاینده‌های منتشرشده محاسبه می‌شوند. مطابق شکل ۸ با استفاده از منوی Plot در نرم‌افزار نمودارها و نقشه‌های مختلف مربوط به سیستم طراحی‌شده، نشان داده می‌شوند.



شکل ۸) منوی رسم نمودارها

۷- صحنه‌گذاری

به منظور اطمینان از روند اندازه‌گذاری، اطلاعات دو مدل خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختارهای متفاوت مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار و مقادیر واقعی برای هر خودرو مطابق جدول ۴ تفاوت چندانی ندارند.

جدول ۳) مشخصات دو خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین

پارامترها		
Hyundai IONIQ	BMW i3	
۱۹۷۰	۱۴۵۴	جرم (kg)
۲/۶۴	۲/۴	مساحت سطح جلویی (m ²)
۰/۲	۰/۲۴	شعاع چرخ (m)
۱/۱	۱/۴	ضریب جرم
۱۸۷	۱۴۸	بیشترین سرعت (km/h)
۸/۹	۷/۲	زمان شتاب‌گیری (s)
۴۷	۱۸۳/۵	مسافت الکتریکی (km)
موازی	سری	ساختار

جدول ۴) اندازه اجزاء دو خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین

اندازه اجزاء اصلی				
Hyundai IONIQ		BMW i3		
نرم‌افزار	کاتالوگ	نرم‌افزار	کاتالوگ	
۷۸/۳	۷۷/۲	۲۹/۸	۲۸	توان موتور احتراقی (kW)
۱/۶	۱/۶	۰/۹	۰/۷	حجم موتور احتراقی (L)
۴۶	۴۴/۵	۱۲۷	۱۲۵	توان موتور الکتریکی (kW)
۶۰	۵۹	۱۶۶	-	توان باتری (kW)
۹/۳	۸/۹	۳۲/۸۵	۳۳/۲	ظرفیت باتری (kWh)

در ادامه قسمت کنترل، وضعیت شارژ باتری، میزان مصرف سوخت، مصرف انرژی و آلاینده‌های منتشرشده برای خودروی Hyundai IONIQ برای حرکت در چرخه رانندگی NEDC توسط نرم‌افزار محاسبه شده‌اند که در جدول ۵ مقادیر ارائه‌شده توسط نرم‌افزار و

%	وضعیت شارژ مرجع	SOC _r
%	وضعیت شارژ باتری در هر لحظه	SOC
Nm	گشتاور موتور احتراقی	T
m/s	سرعت خودرو	V
dm ³	حجم جابجایی موتور	V _d
m/s	بیشترین سرعت خودرو در حالت الکتریکی	V _{emax}
v	ولتاژ مدار باز باتری	V _{oc}
m/s ²	سرعت هوا	V _w
km	مسافت کلی سفر	X
mile	مسافت الکتریکی	x _e
°	زاویه شیب جاده	α
$\frac{g}{cm^3}$	چگالی بنزین	γ _f
-	ضریب جرم	δ
%	بازدهی اتلاف انرژی	η _{loss}
%	بازده مکانیکی موتور الکتریکی	η _m
%	بازده حرارتی موتور احتراقی	η _{th}
%	بازده حجمی موتور احتراقی	η _v
$\frac{g}{m^3}$	چگالی جرمی هوا	P
rpm	دور موتور	ω

منابع

- 1- Anderson CD, Anderson J. Electric and hybrid cars: a history. 2nd Edition. jefferson north Carolina: McFarland; 2010.
- 2- Markel T, Brooker A, Hendricks T, Johnson V, Kelly K, Kramer B, et al. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. Journal of power sources. 2002;110(2):255-266.
- 3- Golbuff S. Design optimization of a plug-in hybrid electric vehicle. SAE Transactions. 2007;116:526-531.
- 4- Taghavipour A, Azad NL, McPhee J. Real-time predictive control strategy for a plug-in hybrid electric powertrain. Mechatronics. 2015;29:13-27.
- 5- Mozaffari A, Chehresaz M, Azad NL. Component sizing of a plug-in hybrid electric vehicle powertrain, Part A: Coupling bio-inspired techniques to meshless variable-fidelity surrogate models. International Journal of Bio-Inspired Computation. 2013;5(6):350-83.
- 6- Ming L, Ying Y, Liang L, Yao L, Zhou W. Energy management strategy of a plug-in parallel hybrid electric vehicle using fuzzy control. Energy Procedia. 2017;105:2660-2665.
- 7- Roohi M, Taghavipour A. Design and development of real-time optimal energy management system for hybrid electric vehicles. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2017;11(3):540-545.
- 8- Fiori C, Ahn K, Rakha HA. Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2018;63:175-185.
- 9- Leikarnes IR. Modelling and simulating a hybrid electric vehicle [Dissertation]. Tromsø, Norway: The Arctic University of Norway; 2017.
- 10- Lowe G. Driving the internet of things. IEEE Design & Test. 2014;31(2):22-27.
- 11- Ehsani M, Gao Y, Longo S, Ebrahimi K. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press; 2018.
- 12- Marano V, Onori S, Guezennec Y, Rizzoni G, Madella N. Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. In: 2009 IEEE Vehicle Power and

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تابیدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محدثه معینیان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ امیر تقوی‌پور (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

منابع مالی: این تحقیق به صورت درون‌دانشگاهی و بدون حمایت سازمان خاصی انجام شده است.

۹- فهرست علائم و نشانه‌ها

نشانه	تعریف	واحد
A _f	مساحت سطح جلویی خودرو	m ²
AFR	نسبت هوا به سوخت	-
BSFC	مشخصه مصرف سوخت ویژه ترمزی	$\frac{g}{kWh}$
C _D	ضریب درگ	-
$\frac{dV}{dt}$	شتاب خودرو	m/s ²
E _{bat}	ظرفیت انرژی باتری	kWh
E _r	انرژی درخواستی راننده	kWh
$\hat{E}$	انرژی پیش‌بینی تولیدشده توسط سیستم محرکه	kWh
F _R	نیروی مقاوم	N
f _r	ضریب مقاومت غلتشی	-
F _t	نیروی کشنده	N
G	شتاب ثقل	m/s ²
i	درصد شیب	%
M	جرم کل خودرو	kg
m	مصرف سوخت	$\frac{L}{100km}$
MPGe	مصرف انرژی باتری	-
n _g	نسبت دیفرانسیل	-
n _i	نسبت دنده گیربکس	-
N _R	تعداد دوران میل‌لنگ در هر سیلندر	-
P _{acc}	توان شتاب‌گیری	kW
P _{bat}	توان باتری	kW
P _{brk}	توان سیستم ترمزگیری مکانیکی	kW
P _{cycle}	توان خودرو در چرخه رانندگی	kW
P _{eMotor-paral}	توان موتور الکتریکی در ساختار موازی	kW
P _{eMotor-serie}	توان موتور الکتریکی در ساختار سری و سری-موازی	kW
P _{eng}	توان تولیدی موتور احتراقی	kW
P _{engine,i}	توان موتور احتراقی در هر لحظه	kW
P _{engine-paral}	توان موتور احتراقی در ساختار موازی و سری-موازی	kW
P _{engine-series}	توان موتور احتراقی در ساختار سری	kW
P _{grade}	توان شیب روی	kW
P _{grade,max}	توان شیب روی با حداکثر زاویه جاده	kW
P _{vemax}	توان حداکثر سرعت خودرو در حالت الکتریکی	kW
P _{vmax}	توان حداکثر سرعت خودرو	kW
Q _{nom}	ظرفیت نامی باتری	kWh
R _{bat}	مقاومت ثابت باتری	Ω
r _w	شعاع چرخ	m
SOC _{high}	حالت شارژ بالای باتری	%
SOC _{low}	حالت شارژ پایین باتری	%

- 21- Mi C, Masrur MA. Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives. Hoboken: John Wiley & Sons; 2017.
- 22- Manualslib. Fiat Asian AF40-6 manual [Internet]. Unknown city: ManualsLib; Unknown Year [Unknown cited]. Available from: <https://www.manualslib.com/manual/1361428/Fiat-Aisin-Af40-6.html>.
- 23- Taghavipour A, Azad NL, McPhee J. An optimal power management strategy for power split plug-in hybrid electric vehicles. International Journal of Vehicle Design. 2012;60(3-4):286-304.
- 24- Bai ZF, Li SX, Cao BG. H_∞ control applied electric torque control for regenerative braking of an electric vehicle. Journal of Applied Sciences. 2005;5(6):1103-1107.
- 25- Varocky BJ, Nijmeijer H, Jansen S, Besselink IJ, Mansvelder R. Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car. TNO Automotive, Helmond & Technische Universiteit Eindhoven (TU/e); 2011 Jun. Report No.: D&C 2011.002.
- 26- Lu D, Ouyang M, Gu J, Li J. Instantaneous optimal regenerative braking control for a permanent-magnet synchronous motor in a four-wheel-drive electric vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2014; 228(8):894-908.
- 27- Schwarzer V, Ghorbani R. Drive cycle generation for design optimization of electric vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2012;62(1):89-97.
- Propulsion Conference; 2009 Sep 7-10; Dearborn, MI, USA. IEEE; 2009. p. 536-543.
- 13- Hendricks E, Chevalier A, Jensen M, Sorenson SC, Trumphy D, Asik J. Modelling of the intake manifold filling dynamics. SAE Transactions. 1996;105:122-46.
- 14- Bowling B, Grippo A. Creating an initial AFR table for tuning [Internet]. Unknown city: MicroSquirt3; 2011 [Unknown cited]. Available from: <http://www.useasydocs.com/theory/afrrtable.htm>.
- 15- Jurgen RK. Automotive electronics handbook. New York: McGraw Hill Professional; 1999.
- 16- Shams-Zahraei M, Kouzani AZ, Kutter S, Bäker B. Integrated thermal and energy management of plug-in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources. 2012;216:237-248.
- 17- Committee S. Vertical Alignment, Chapter 12. In: Queensland. Main Roads Department. Road planning and design manual. 1st Edition. Brisbane: Queensland Government; 2002.
- 18- DJB. Driveway approach & departure angles. Public Works & Utilities Engineering & Design Standards. Florida: Altamonte Springs; 2017.
- 19- Friedman PD, Grossweiler P. An analysis of U.S. federal mileage ratings for plug-in hybrid electric vehicles. Energy Policy. 2014;74:697-702.
- 20- Bayarsuren B, Odbileg N, Ganbat D. TOYOTA engine sensor fault affects to the engine exhaust CO and CH emissions. 2008 Third International Forum on Strategic Technologies, 23-29 June 2008, Novosibirsk-Tomsk, Russia. Piscataway: IEEE; 2008.