کاهش مصرف سوخت خودرو با فناوری نیم‌دونیرو ۴۸ ولت توسط استراتژی بهینه ECMS

زهرا صبح خیز میاندهی*[۱]، سید وحید حسینی[۲]، شهرام آزادی[۳]، محمدرضا جمشیدی‌کارگر[۴]

[*۱]دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی Zahrasobhkhiz74@Email.kntu.ac.ir
[۲]عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود V_hosseini@Shahroodut.ac.ir
[۳]عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی Azadi@Kntu.ac.ir
[۴]دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر Mrjamshidi@Aut.ac.ir

چکیده

آلودگی هوا، اثرات گازهای گل‌خانه‌ای و احتمال کمیاب شدن سوخت‌های فسیلی از جمله مشکلات زیست محیطی حال حاضر در سراسر جهان هستند یکی از راه حل‌های پیش‌رو برای رفع این مشکلات، توسعه و رشد صنعت خودروهای مدرن از قبیل خودروهای الکتریکی و دونیرو است. از برتری‌های اصلی خودورهای دونیرو نسبت به خودروهای تک‌نیرو معمول، مدیریت بهینه منابع انرژی با هدف کمینه کردن مصرف سوخت فسیلی و انتشار گازهای آلاینده است. پیشران‌های نیم‌دونیرو (MHEV) به سبب قابلیت اطمینان بالا درازای هزینهٔ ارزان و تغییرات کم در قوای محرکه تک‌نیرو و قطعات، جز گزینه‌های مطرح در این صنعت رو به رشد هستند. این پژوهش اثر کاهش مصرف سوخت بنزین را با اضافه کردن سامانه نیم‌دونیرو ۴۸ ولت به یک خودروی تک‌نیرو بررسی می‌نماید. به منظور کنترل تقسیم توان مورد نیاز حرکت خودرو بین پیشران‌های برقی و احتراقی از الگوریتم ECMS استفاده گردید؛ سپس با احتساب مصرف سوخت ویژه خودرو به صورت تطبیقی، کاهش مصرف سوخت بهینه‌سازی شد. در این تحقیق از بسته نرم‌افزاری MATLAB و GT-Suite به منظور الگوسازی کامل خودرو تک‌نیرو و نیم‌دونیرو P0 و P2 و کنترل‌کننده تقسیم توان استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت خودرو نیم‌دونیرو P2 در چرخه‌های WLTC، NEDC و FTP-7 با استفاده از الگوریتم تقسیم توان ECMS، به ترتیب کاهش مصرف سوخت ۱۴/۷، ۲۱/۴ و ۲۳/۱ درصدی را نسبت به خودرو تک‌نیرو نشان می‌دهد. همچنین استفاده از الگوریتم ECMS تطبیقی باعث شد مصرف سوخت خودرو دونیرو نسبت به حالت قبل و در چرخه‌های یاد شده به ترتیب ۰/۴، ۰/۳و ۰/۳ درصد کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: مصرف سوخت، موتور احتراق داخلی، خودروی نیم‌دونیرو، هیبرید

Fuel Consumption Reduction of 48 v Mild Hybrid Technology Using Optimal ECMS

Zahra Sobhkhiz miandehi*[1], Seyed Vahid Hosseini[2], Shahram Azadi[3], Mohammad Reza Jamshidi Kargar[4]

[1*] MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology. Zahrasobhkhiz74@Email.kntu.ac.ir
[2] Assistance Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology. V_hosseini@Shahroodut.ac.ir
[3] Assistance Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology Azadi@Kntu.ac.ir
[4] MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, AmirKabir University of Technology. Mrjamshidi@Aut.ac.ir

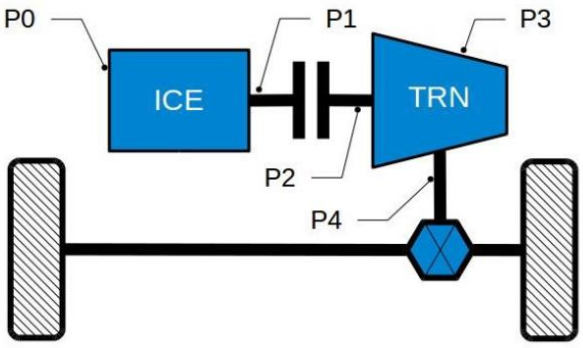
Abstract

Air pollution, greenhouse effect, and probable decrease in fossil fuel resources are samples of environmental problems, currently facing the world. One of the leading solutions to solve these problems is the development and growth of the modern automotive industry, such as EV and HEV's. As one of the main advantages of HEV over conventional vehicles, optimal energy management with aim of fuel consumption and emissions minimization. Mild hybrid vehicles are becoming popular in the automotive industry due to providing reliability at low cost while making minimum changes in conventional vehicles powertrain. This study investigates the fuel consumption minimization caused by implementation of 48 v system on a conventional vehicle. The ECMS was used to control the distribution of power required for vehicle between engine and EM. Then, by taking into account the adaptive specific fuel consumption of vehicle, the reduction of fuel consumption was optimized. MATLAB and GT-Suite were used in order to fully model the P0 and P2 HEV and conventional vehicle and the power distribution controller which the results in WLTC, NEDC & FTP75 cycles using ECMS algorithm respectively shows 14.7%,21.4% and 23.1% reduction in fuel consumption compared to conventional vehicles. Also, adaptive ECMS algorithm reduced fuel consumption of HEV compared to previous state in mentioned cycles by 0.4,0.3 and 0.3 percent respectively.
Keywords: Mild Hybrid, BiSG, Internal Combustion Engine, Fuel Consumption, GT-SUITE

مقدمه

خودروی هیبرید یا دونیرو در معنای فنی به خودرویی اطلاق می‌شود که حداقل دو منبع انرژی در سامانه پیشران خود دارا باشد. امروزه متداول‌ترین نوع خودرو دونیرو، خودروهای دونیرو برقی هستند که از دو پیشران احتراق داخلی و پیشران برقی بهره می‌برند.

مساله تقسیم توان بین این دو پیشران برای کمینه کردن میزان مصرف سوخت، بدون ایجاد تاثیر منفی بر عملکرد دینامیکی خودرو بسیار حائز اهمیت است. استراتژی‌های متنوعی در زمینه تقسیم توان در خودرو دونیرو طراحی و پیاده‌سازی شده اند که از نظر بهینه‌سازی (عمومی یا محلی)، پیچیدگی ساختار، زمان محاسبات، دانش پیش‌بینی الگوی رانندگی و میزان اثربخشی الگوریتم متفاوت هستند. دو نوع طبقه‌بندی در خودروهای دونیرو انجام می‌شود که در نوع اول پیشران‌های ترکیبی در گروه سری، موازی و سری–موازی قرار دارند و در نوع دوم این پیشران‌ها در گروه دونیرو چرخی، نیم‌دونیرو و دونیرو کامل قرار می‌گیرند. دسته‌بندی نوع اول، ترتیب تامین انرژی مورد نیاز پیشرانش خودرو توسط دو پیشران خودرو نیم‌دونیرو را نشان می‌دهد. در خودروهای سری، تنها پیشران برقی با سامانه انتقال قدرت ارتباط مکانیکی دارد و وظیفه پیشران احتراق داخلی، شارژ باتری خودرو است. در خودرو دونیرو از نوع موازی هر دو پیشران قابلیت اتصال مکانیکی به سامانه انتقال قدرت را دارا هستند و توامان می‌توانند انرژی مورد نیاز خودرو را تامین کنند. هدف این پژوهش بررسی میزان کاهش مصرف سوخت خودرو با استفاده از سامانه نیم‌دونیرو (MHEV)[1] موازی است. با توجه به محل اتصال پیشران برقی به سامانه انتقال قدرت، این نوع از خودرو دونیرو، به ۵ نوع P0 الی P5 تقسیم می‌گردد.



شکل ۱– جانمایی پیشران احتراق داخلی در ساختارهای P0 الی P4

در معماری P0 پیشران احتراق داخلی (ICE) و پیشران برقی را نمی‌توان از هم جدا کرد، زیرا از طریق تسمه سامانه متعلقات به صورت مکانیکی به یکدیگر متصل می شوند بنابراین، یکی از معایب پیکربندی P0 اینست که، گشتاور اصکاکی پیشران احتراق داخلی در هنگام تقویت گشتاور و یا زمان بازیابی انرژی الکتریکی، برای پیشران برقی به عنوان بار اضافی اعمال می‌شود. با اینحال معماری نیم دونیرو ۴۸ ولت P0 توسط تولیدکنندگان خودرو برای MHEV استفاده می‌شود، زیرا ترکیبی از هزینه جانمایی نسبتاً کم و مزایای قابل توجه از نظر کاهش انتشار CO_2 و افزایش عملکرد خودرو را به همراه دارد. معماری P0 نوعی از پیکربند است که پیشران برقی مستقیماً به میل لنگ متصل است و راه حلی است که هوندا در فناوری نسل اولش به کار برد. در این معماری پیشران برقی در هنگام کاهش سرعت خودرو به عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند و هنگام شتابگیری خودرو به عنوان دستیار انرژی برای پیشران احتراق داخلی در تولید گشتاور عمل می‌کند مهمترین مزیت این پیکربندی این است که پیشران برقی می‌تواند گشتاور بیشتری نسبت به BiSG داشته باشد زیرا محدودیت تسمه را (به دلیل لغزش) ندارد. در پیکربندی P2، پیشران برقی می‌تواند به صورت جانبی به گیربکس متصل شود، از طریق یک تسمه متصل شود یا در گیربکس از طریق دنده متصل شود. مهمترین مزیت معماری P2 افزایش پتانسیل بازیابی انرژی و امکان‌پذیری توابع کنترل (خزش برقی / و بازیابی انرژی در هنگام Coasting) است. مهمترین مزیت معماری‌های P3 یا P4 داشتن بالاترین پتانسیل بازیافت انرژی است. اتلاف انرژی در پیشران احتراق داخلی و گیربکس، هنگامی که اتصال قوای محرکه در زمان بازیابی انرژی قطع می‌شود در مقایسه با پیکربندی‌های P0، P1 و P2، ، ناچیز است.همچنین در پیکربندیP4 خودرو دارای ۴ چرخ محرک خواهد بود زیرا پیشران احتراق داخلی محور جلو را حرکت می‌دهد و پیشران برقی نیروی محرکه محور عقب را تامین می‌کند

شرکت Hyundai Autron طی پژوهشی، روش ECMS را برای کمینه کردن مصرف سوخت در پیشران نیم‌دونیرو BiSG مورد استفاده قرار داد و تغییرات مصرف سوخت را نسبت به پیشران احتراقی معمولی، ارائه کرده است[1]. در سال ۲۰۱۲ چهار نفر از اعضای IEEE به بررسی یک نمونه اولیه خودرو با اعمال قیود و محدودیتهای رانندگی از قبیل استارت موتورو زمان مناسب برای تغییر قوای محرکه با استفاده از Dynamic Programming پرداختند که انجام این تست‌ها و شبیه سازی‌ها و اعمال کنترلرهای SD-SDP بر روی انواع سیکلهای رانندگی از قبیل NEDC و FTP بهبود ۱۱ درصدی مصرف سوخت را نشان داده اند[1]. سودوک لی و همکارانش در آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا[2] در سال ۲۰۱۸ مقاله ای به چاپ رسانیدند که با استفاده از نرم‌افزار آلفا[3] و شبیه سازی صورت گرفته در GT-Drive به محاسبه گازهای گلخانه ای حاصل از یک خودرو نیم‌دونیرو ۴۸ ولت و تاثیر استراتژی کنترل توان بر تولید آنها پرداخته اند. روش ذکر شده ابتدا برای خودرو شورولت مالیبو ۲۰۱۳[4] که یک خودرو نیم‌دونیرو ۱۱۵ ولت

1 Mild Hybrid Electric Vehicle

2 U.S. Environmental Protection Agency

3 ALPHA (Advanced Light-Duty Powertrain and Hybrid Analysis)

4 Chevrolet Malibu 2013

با پیشران برقی ۱۵ کیلووات است، پیاده سازی شد و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمون تجربی آلایندگی این خودرو که توسط سازمان Argonne National Laboratory ایالات متحده آمریکا ارائه شده است، صحه گذاری گردید[2]. نیکولاس دنیس، الگوریتم ژنتیکی عرضه کردند که در زمان کم این مساله را حل نماید. این روش شامل موارد زیر است: تعریف قوانین کنترل و مشخصه‌های کنترل بر اساس برنامه نویسی دینامیکی ژنتیک الگوریتمی که مقادیر غیر خطی این مشخصه ها را در زمان کم برای چرخه رانندگی معلوم محسابه می‌کند است. در این مقاله ابتدا با استفاده نرم‌افزار GT-Suite، خودرو با پیشران احتراق داخلی الگوسازی شد. سپس با اتصال پیشران برقی، باتری، و سایر تجهیزات و اتصالات لازم، سامانه BiSG در آن، پیاده سازی گردید. عملکرد این دو خودرو، در سیکل‌های NEDC و WLTC بررسی گردید و میزان بهبود مصرف سوخت خودرو پس از پیاده سازی سامانه نیم‌دونیرو ۴۸ ولت گزارش شد[3]. در سال ۲۰۱۳ محمد جواد اکبری نوقابی و همکارش روش بدست آوردن نقطه بهینه عملکرد پیشران احتراقی در خودرو دونیرو سری را در تحقیق خود منتشر کردند. برای افزایش کارکرد بهینه خودرو، دو قوای محرکه احتراقی و برقی با هم ترکیب می‌شوند تا از مزایا و راندمان بالای پیشران برقی در کنار پیشران احتراقی استفاده شود. با بررسی استراتژی‌های کنترل خودرو دونیرو سری، روشهای موجود برای بدست آوردن نقطه عملکرد بهینه پیشران احتراقی در پروژه ساخت خودروی دونیرو بیان شده و در ادامه خروجی نرم‌افزار با نتایج آزمون عملی مقایسه شده است[4]. در این پژوهش الگوسازی خودرو نیم‌دونیرو P0 وP2 با استفاده از نرم افزار GT-Suite، انجام شد و استراتژی کنترل بهینه مصرف سوخت معادل[1] ECMS در MATLAB اجرا و همگام با الگوی خودرو به منظور مطالعه عملکرد خودرو نیم‌دونیرو به کار گرفته شد.نتایج مربوط به مصرف سوخت در چرخه های رانندگی NEDC، WLTCوFTP75 گزارش گردید و درصد بهبود مصرف سوخت در هرکدام از چرخه های یاد شده ارائه شد. معماری P0 به دلیل تغییرات اندک در قوای محرکه تک‌نیرو و قطعات در ازای هزینه ارزان و با داشتن اثر مطلوب جزو انتخاب‌های اصلی خودروسازان نیز می‌باشند. پیشران برقی در این نوع از خودرو، جایگزین مولد جریان خودرو معمولی می‌شود. پیشران برقی برای کمک به پیشران احتراقی در تامین توان و همچنین بازیابی انرژی ترمزگیری خودرو طراحی شده است. نحوه اتصال پیشران برقی به احتراقی به کمک تسمه می‌باشد تا در موازات پیشران احتراقی به تامین توان مورد نیاز خودرو بپردازد. از مزایای این معماری نیاز به تنها یک موتور الکتریکی و امکان کوچکتر کردن پیشران احتراقی را می‌توان نام برد، همچنین این نوع از معماری قابلیت‌های زیر را فراهم می‌کند:

- Start-stop
- E-Drive
- Regenerative braking
- Torque Assist
- Load point moving (LPM)

این ساختار در مقایسه با خودروهای معمولی می‌تواند مصرف سوخت را ۲۰ تا۳۰ درصد کاهش دهد. نمونه هایی از این خودروها Honda Insight Hybrid و Civic Hybrid وVW Golf GTE را می‌توان نام برد. ساختار P0 علاوه بر مزیت‌های یاد شده معایبی نیز دارد. در پیکربندی P0 پیشران برقی سمت پیشران احتراق داخلی قرار دارند، بدون اینکه امکان قطع ارتباط مکانیکی وجود داشته باشد و این امر باعث می‌شود که افزایش گشتاور و بازیابی انرژی به دلیل تلفات گشتاور،چندان کارآمد نباشد. علاوه بر این، بازیابی انرژی الکتریکی با خاموش کردن پیشران، در هنگام حرکت لغزشی (coasting) امکان پذیر نیست. در حالی که معماری P2 عمدتا به دلیل جانمایی مناسبشان از نظر بازده جریان انرژی بهتر است. پیشران برقی در معماری P2 بعد از کلاچ، در محور ورودی جعبه دنده،

مدلسازی خودرو

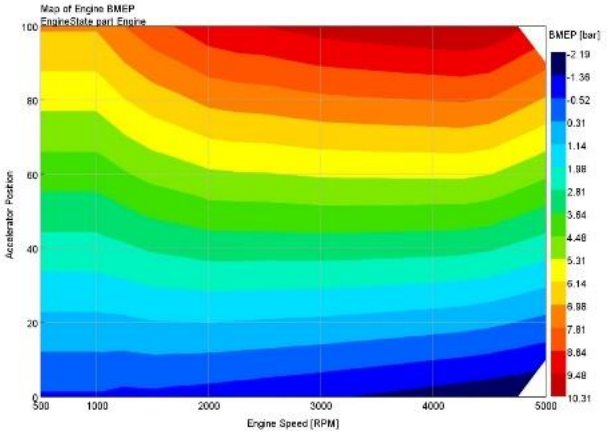
در پژوهش حاضر از الگوی رو به جلو خودرو به منظور شبیه‌سازی عملکرد آن در چرخه‌های رانندگی استفاده شد و از الگوی رو به عقب خودرو، به منظور پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی بهره برده شد. الگوی رو به جلوی خودروی تک‌نیرو و نیم‌دونیرو در نرم‌افزار GT-Suite پیاده‌سازی گشت. از آنجا که الگوی خودروی تک‌نیرو، مشابه محتوای پژوهش قبلی نویسندگان این مقاله، شبیه‌سازی شده است از آوردن جزییات مدلسازی آن اجتناب شد[5]. پیشران احتراق داخلی مورد استفاده در مدلسازی، دارای بیشینه گشتاور ۱۶۴ نیوتن متر و بیشینه توان خروجی ۷۶ کیلووات و وزن خودرو ۱۲۰۰ کیلوگرم است. سایر مشخصات خودرو در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- جزییات فنی خودروی الگوسازی شده

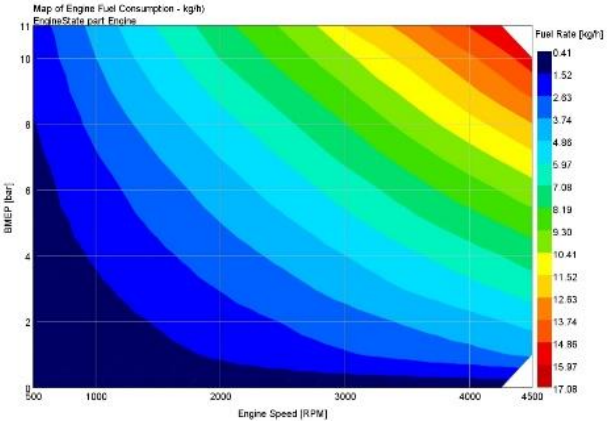
وزن خودرو	۱۲۰۰ kg
مساحت جلوی خودرو	۳/۵ m^2
ضریب درگ	۰/۳۲
نوع موتور	۴ سیلندر
حجم موتور	۲۰۰۰ cm^3
شعاع دوار تایر	۳۳۴ mm
چگالی سوخت	۷۵۰ kg/m^3

اطلاعات به دست آمده در اتاق‌های آزمون و با استفاده از دینامومتر، داده های تجربی لازم برای استخراج نمودارهای پیشران احتراق داخلی که در شکل ۱و۲ نشان داده شده است را فراهم نموده است:

1 Equivalent Consumption Minimization Strategy



شکل ۲- فشار ترمزی موثر



شکل ۳- نرخ مصرف سوخت پیشران احتراق داخلی

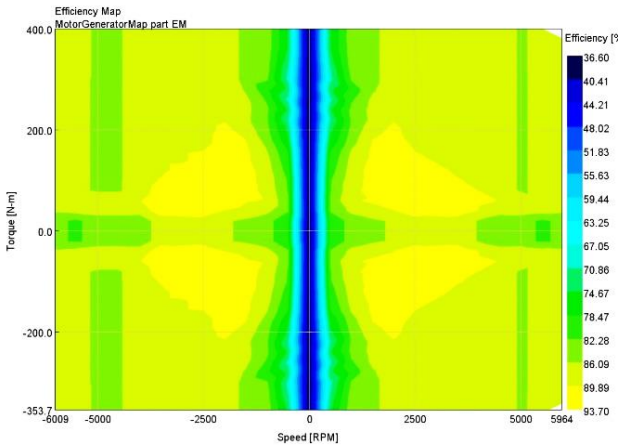
الگوی شبیه سازی شده از استراتژی جدول ۲ برای تصمیم گیری در مورد زمان تعویض دنده استفاده می‌کند. طبق این الگو نسبت دنده در سرعت‌های مشخص شده و با توجه به اینکه روند تغییر شماره دنده افزایشی یا کاهشی است، تغییر می‌کند.

جدول ۲- مشخصات جعبه دنده ۶ سرعته

تعویض شماره دنده از:	۱ به ۲	۲به ۳	۳ به ۴	۴ به ۵	۵ به ۶
در سرعت:	۲۰	۲۹	۴۷	۶۶	۸۲
تعویض شماره دنده از:	۲ به ۱	۳ به ۲	۴ به ۵	۵ به ۶	۶ به ۷
در سرعت:	۱۸	۲۶	۴۵	۶۳	۸۰

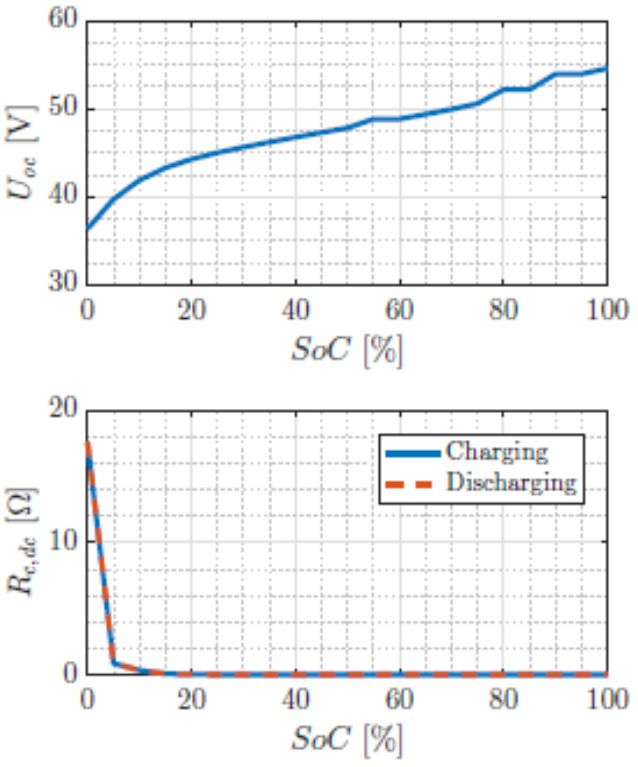
اجزای اصلی که برای مدلسازی قوای محرکه دونیرو به کار می‌روند، در کنار اجزای خودروی تک‌نیرو به کار می‌روند پیشران برقی، باتری و سامانه کنترل خودروی نیم‌دونیرو هستند. اجزا تشکیل دهنده و معماری الگو خودرو نیم‌دونیرو P0 در شکل۴ و خودرو نیم‌دونیرو P2 در شکل۵ آورده شده است. در مدل خودرو P0 پیشران برقی از طریق تسمه متعلقات به پیشران احتراق داخلی متصل می‌گردد. و در ساختار P2 این پیشران در ورودی جعبه دنده و با کمک یک کلاچ اضافی نصب می‌گردد.

پیشران برقی به مثابه قلب خودروی دونیرو بوده و حائز اهمیت بالایی است. پیشران‌های برقی هم به عنوان مولد و هم موتور مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند به دلیل این دو قابلیت، در ذخیره انرژی ترمز و کاهش مصرف سوخت تاثیر بسزایی داشته باشند. نمودار شکل۳ بازده وگشتاور پیشران برقی با توان ۱۲ کیلووات که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است را نمایش می‌دهد.

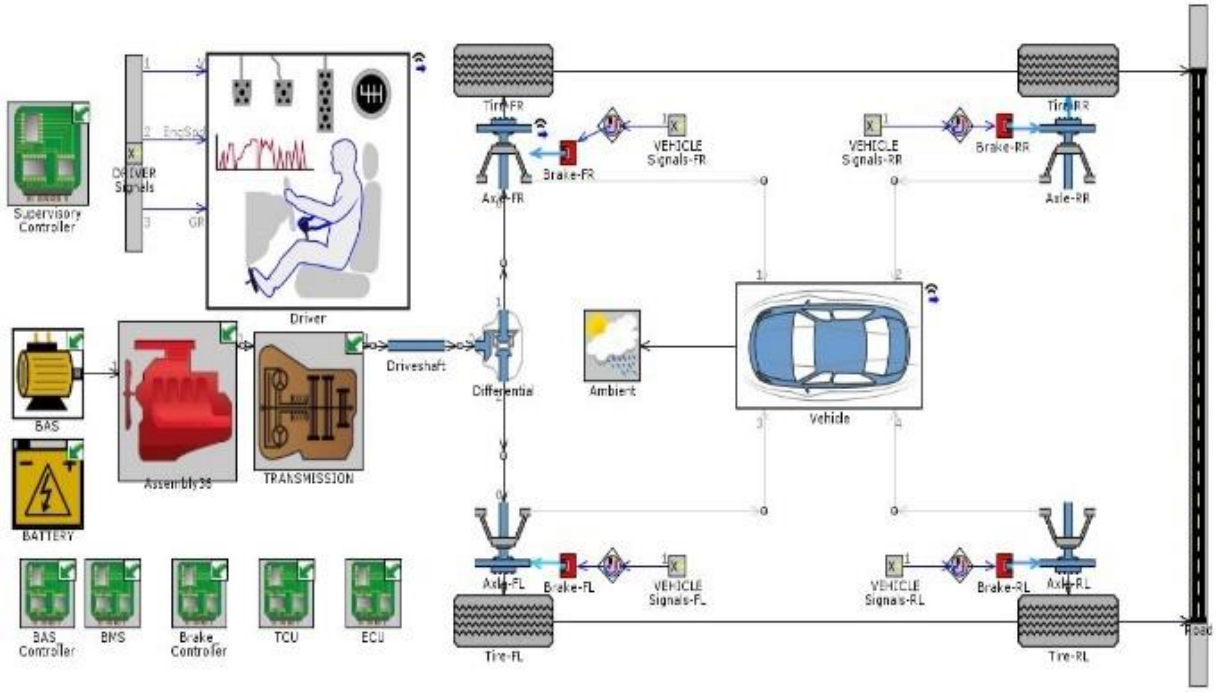


شکل ۴- بازده و گشتاور پیشران بر حسب سرعت دورانی پیشران احتراقی

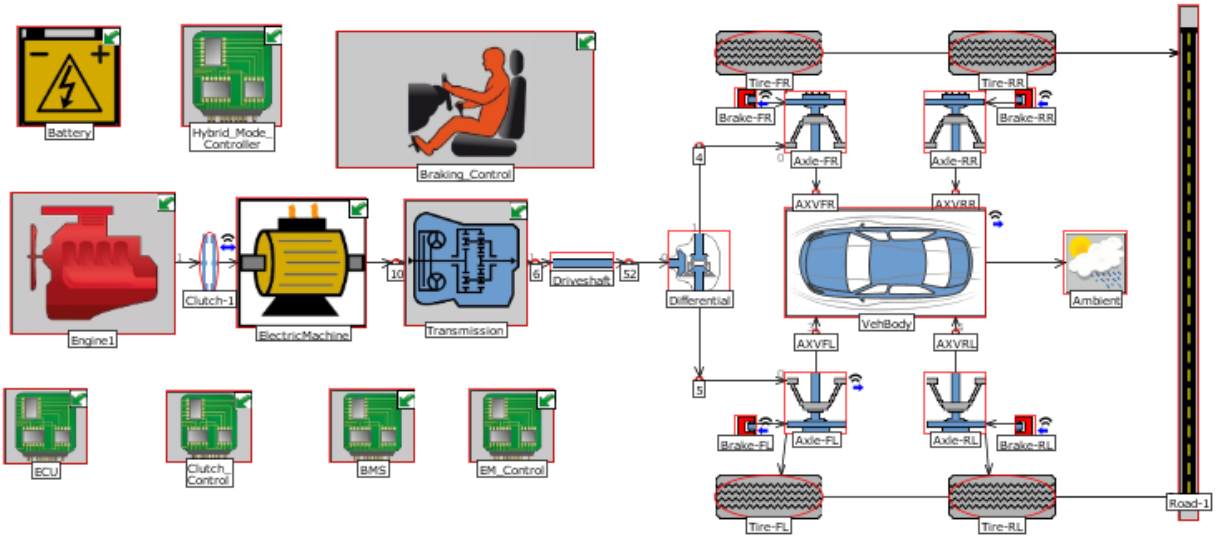
ظرفیت نامی باتری استفاده شده در مدل رو به عقب و مدل رو به جلو، با فرض مثبت بودن جریان باتری ۱۰ آمپرساعت و ولتاژ حداقل و حداکثر آن به ترتیب۳۷ و ۵۴ ولت است. شکل ۶ نمودار ولتاژ مدار باز و مقاوت داخلی باتری را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ولتاژ مدار باز و ویژگی‌های مقاومت داخل



شکل ۶- اجزا تشکیل دهنده الگو خودرو نیم‌دونیرو P0



شکل ۷- اجزا تشکیل دهنده الگو خودرو نیم‌دونیرو P2

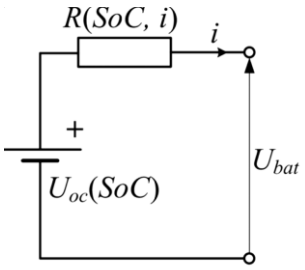
مدل رو به عقب در نرم‌افزار متلب به منظور پیاده‌سازی الگوریتم ECMS و بهینه سازی مصرف سوخت در هر پله زمانی مورد استفاده قرار گرفت. در نرم افزار GT-Suite برای شبیه‌سازی هر جز از خودرو از بسته‌های آماده ای که در نرم‌افزار وجود دارد، استفاده گردید. اما در مدل رو به عقب از معادلات حاکم بر اجزا برای اجرای محاسبات استفاده شد. در ابتدا شتاب مورد نیاز خودرو به منظور تحقق چرخه رانندگی ورودی، از معادله ۱ محاسبه گردید و سپس گشتاور مورد نیاز در محل چرخ برای ادامه حرکت با در نظر گرفتن اینرسی آن بدست آمد و به عنوان ورودی به مدل رو به عقب داده شد.

$$Acc\ Demand = \frac{Vehicle\ Speed_{target} - Vehicle\ Speed_{actual}}{1s} * Precontrol\ Aggressiveness \qquad (۱)$$

این مدل به همراه الگوریتم کنترلی، توان درخواستی بهینه از دو قوه‌ی محرکه را محاسبه می‌نماید و به صورت برخط به مدل رو به جلو ارسال می‌گند تفاوت بین مدل روبه عقب و مدل رو به جلو این است که مدل رو به جلو شامل تأثیرات دینامیکی غالب مانند اینرسی های پیشرانه است.

شبیه سازی باتری در مدل رو به عقب

با استفاده از معادلات مدار باتری معادل، مدل باتری را ایجاد میکنیم. ویژگی‌های ولتاژ مدار باز باتری $U_{oc}(SOC)$، تابعی از SOC باتری است و مقاومت داخلی R(SoC,i) وابسته به سطح شارژ باتری و جریان باتری i است. مقادیر مختلف R_c و R_{dc} به ترتیب برای مقاومت الکتریکی در زمان شارژ و دشارژ استفاده می‌شود.



شکل ۸- مدارِ باز معادل باتری

دینامیک SoC باتری توسط معادله (۲) حذف شده است:

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{-i}{Q_{max}} \qquad (۲)$$

Q_{max} حداکثر شارژ باتری است. جریان (i) در معادله (۲) ذکر شده است. از معادله توان باتری، P_{batt}، به شرح زیر است:

$$P_{batt} = U_{oc}(SoC)i(t) - R(SoC,i)i^2(t) \qquad (۳)$$

با قرار دادن معادله (۳) در معادله (۲) نتیجه زیر به عنوان معادله (۴)حاصل می‌شود:

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\sqrt{U_{oc}^2(SoC) - 4R(SoC,i)P_{batt}} - U_{oc}}{2Q_{max}R(SoC,i)} \qquad (۴)$$

توان باتری P_{batt} از توان EM به شرح زیر معادله (۵) به دست می‌آید:

$$P_{batt} = \eta_{em}^{k}\tau_{em}\omega_{em} \qquad (۵)$$

η_{em} بازده پیشران برقی است و ضریب K در حالت کاری موتوری برابر ۱- و در حالت کاری ژنراتوری برابر ۱ است. رویکرد ECMS، که بعداً توضیح داده می‌شود، به دانش عملکرد باتری نیاز دارد، که از مدل باتری، همانطور که در شکل بالا نیز مشخص شده است، مشخص می‌شود. در حالت تخلیه شارژ، بازده باتری به صورت مطرح شده در معادله (۶) محاسبه می‌شود[6]:

$$\eta_{batt,dc} = \frac{P_{batt}}{P_{batt} + i^2(t)R_{dc}} \qquad (۶)$$

و برای حالت شارژ شدن باتری، بازده توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\eta_{batt,c} = \frac{U_{oc}(t) - R_{dc}|i(t)|}{U_{oc}(t) + R_c|i(t)|} \qquad (۷)$$

مدلسازی قوای محرکه در مدل رو به عقب

در مدل رو به عقب حالت‌های گذرای پیشران احتراقی در نظر گرفته نشده است بلکه فقط حالت‌های ماندگار سیستم شامل BSFC و منحنی گشتاور بیشینه پیشران احتراقی لحاظ گردیده است. سیستم درایو کمکی MHEV یک موتور الکتریکی آسنکرون با توان نامی ۱۲ کیلو وات و ولتاژ نامی ۴۸ ولت حداکثر سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه است. مشابه ICE، برای EM فقط حالت‌های ماندگاردر مودهای کاری موتوری و ژنراتوری نشان داده شده است که شامل منحنی بیشینه گشتاور و نقشه بازده پیشران برقی است.

استراتژی به حداقل رساندن مصرف سوخت معادل (ECMS)

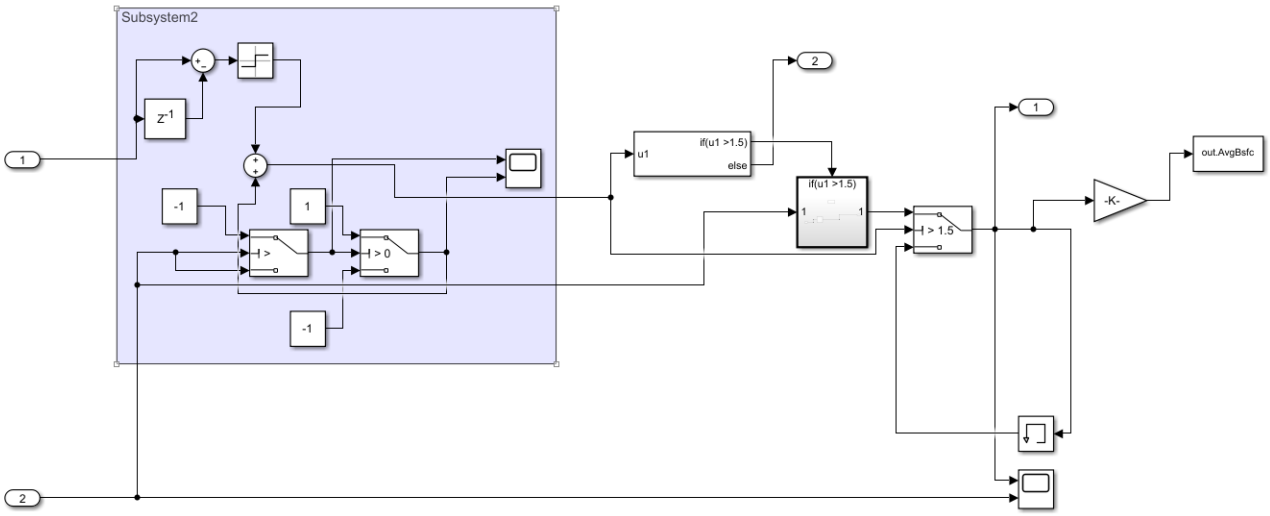
برای کنترل بهینه قوای محرکه از استراتژی (ECMS) استفاده می‌شود. این راه حل یک روش ابتکاری است که بیان می‌کند انرژی استفاده شده برای به حرکت درآوردن خودرو، نهایتا از طریق پیشران احتراقی تامین می‌شود و سیستم دونیرو صرفا به عنوان یک تقویت کننده انرژی عمل می‌کند. به عبارت دیگر انرژی الکتریکی باتری به نوعی از انرژی شیمیایی سوخت حاصل شده است[7]. با توجه به اینکه مصرف انرژی باتری و مصرف سوخت به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، یک سوخت معادل به شرح زیر در معادله (۸) تعریف شده است:

$$\dot{m}_{eq} = \begin{cases} A_{ek}P_{ice} + A_{ek}\eta_{batt,c}P_{batt}, & P_{batt,c} < 0 \\ A_{ek}P_{ice} + \overline{A_{ek}}\eta_{batt,dc}^{-1}P_{batt}, & P_{batt,dc} > 0 \end{cases} \qquad (۸)$$

P_{ice} توان ICE، $P_{batt,c}$ و $P_{batt,dc}$ مقادیر توان باتری در هنگام شارژ و تخلیه شارژ هستند $\eta_{batt,c}$ و $\eta_{batt,dc}$ بازده باتری در زمان شارژ و دشارژ است A_{ek}. مصرف سوخت ویژه و $\overline{A_{ek}}$ متوسط مصرف سوخت ویژه هنگام دشارژ باتری، در حداکثر گشتاور ICE است $\overline{A_{ek}}$. به طور معمول یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود که معادل میانگین مصرف سوخت ویژه هنگام شارژ باتری طی اجرای چرخه کامل رانندگی است. این درحالی است. که راننده در واقعیت، مطابق چرخه‌های استاندارد رانندگی نمی‌کند. به همین دلیل

بایستی $\overline{A_{ek}}$ متناسب با نحوه حرکت خودرو و نقاط کاری پیشران احتراق داخلی تغییر کند. راه حل پیشنهادی، میانگین‌گیری برخط است به طوری که $\overline{A_{ek}}$ معادل میانگین مصرف سوخت ویژه هنگام شارژ باتری در لحظه‌های قبلی است. در این صورت این ضریب با شیوه‌رانندگی راننده تطبیق می‌یابد. دیاگرام محاسبه این کمیت در متلب در شکل ۷ نشان داده شده است.

کنترل توسط ECMS با کمک مدل رو به عقب خودرو و به دو روش برون‌خط و برخط صورت می‌گیرد. در روش برون‌خط ابتدا دامنه کاری خودرو تعریف می‌گردد. اینکه سطح شارژ باتری و سرعت شفت خروجی قوای محرکه چه مقدار است و گشتاور مورد نیاز در چرخ چند نیوتن‌متر است، تعیین می‌کند که چگونه باید توان بین دو پیشران تقسیم شود. به همین دلیل ابتدا بایستی تمامی نقاط کاری خودرو تعریف گردند. این کار عملا غیر ممکن است اما می‌توان ابری از نقاط را تشکیل دادکه در شکل۸ نشان داده شده و مصرف سوخت را در آن نقاط کمینه کرد. به عنوان مثال می‌توان بازه سطح شارژ را به ۲۰ نقطه، بازه قوای محرکه را به ۱۰ نقطه و بازه گشتاور مورد نیاز ورودی را به ۴۰ نقطه تقسیم کرد. به این ترتیب ۸۰۰۰ نقطه کاری برای خودرو به دست می‌آید. برای این ۸۰۰۰ نقطه تمامی حالات ممکن تقسیم توان محاسبه می‌گردد و کمینه آن به دست می‌آید.



شکل ۹- محاسبه A_{ek} به صورت تطبیقی

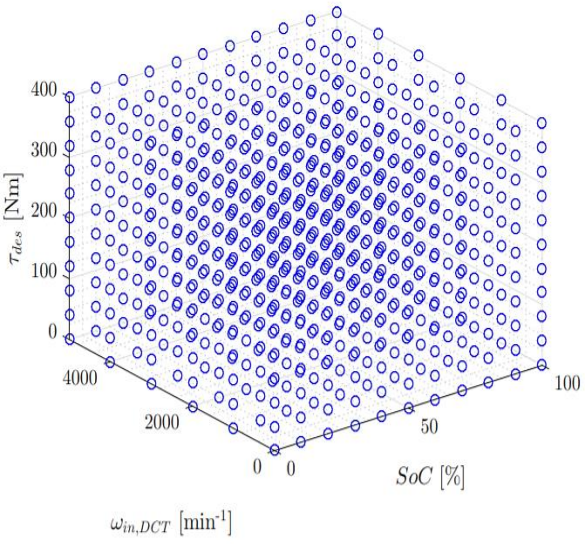
توان تعیین شده برای پیشران احتراق داخلی و برقی به عنوان خروجی هر نقطه در نظر گرفته می‌شود. در نهایت یک جدول خواهیم داشت که با ورودی گشتاور مورد نیاز سطح شارژ و سرعت مشخص، تقسیم توان بهینه را ارائه می‌دهد[8]. در روش برخط نیز از مدل رو به عقب خودرو کمک می گیریم. این مدل به صورت برخط و موازی با مدل رو به جلو خودرو که در نرم‌افزار GT-Suite بدست آمده است اجرا می‌گردد و ۲۰۰ نقطه بین گشتاور بیشینه و کمینه پیشران برقی با استفاده از رابطه (۹) تعیین می‌گردد که آرایه‌های بردار گشتاور پیشران برقی است:

$$\tau_{em_i} = \frac{i*\tau_{em,max}-\tau_{em,min}}{200} - \tau_{em,min} \qquad (۹)$$

گشتاور پیشران احتراق داخلی متناظر با این ۲۰۰ نقطه از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\tau_{wh,ice_i} = \tau_{wh,req} - \tau_{wh,em_i} \qquad (۱۰)$$

آرایه‌های بردار گشتاور پیشران احتراق داخلی با وارد کردن τ_{wh,ice_i}در مدل رو به عقب خودرو τ_{ice_i}به دست می‌آید.همچنین



شکل ۱۰- ابر نقاط کاری خودرو در بهینه‌سازی برون‌خط

با استفاده از این مدل توان مورد نیاز باتری در هرلحظه محاسبه می‌گردد. میزان مصرف سوخت محاسبه شده برای هر عضو بردار

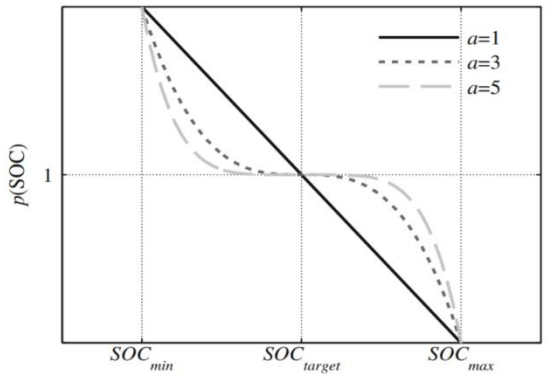
گشـــتـاور پیشـــرانـه احتراق داخلی در مقـدار ارزش حرارتی پـایین بنزین[1](LHV) ضـــرب می‌شـــود تا توان حاصـــل از ســـوختن بنزین محاسبه گردد:

$$P_{fuel} = \dot{m} * Q_{lhv} \qquad (۱۱)$$

توان حاصل از سوختن بنزین با توان حاصل از مصرف باتری و توابعی که به منظور محدود کردن بازه انتخابی به کار گرفته شده اند، جمع می‌گردد. حال برای گشتاور درخواستی چرخ حدود ۲۰۰ نقطه داریم که باید کمینه آن انتخاب گردد و به عنوان جواب برای تعیین گشتاور پیشران برقی و احتراقی به مدل GT-Suite فرستاده می‌شود. به منظور جلوگیری از خروج سطح شارژ باتری از محدوده مورد نظر از تابع زیر استفاده می‌شود:

$$P(soc) = 1 - \left(\frac{soc(t) - soc_{target}}{(soc_{max} - soc_{min})/2}\right) \qquad (۱۲)$$

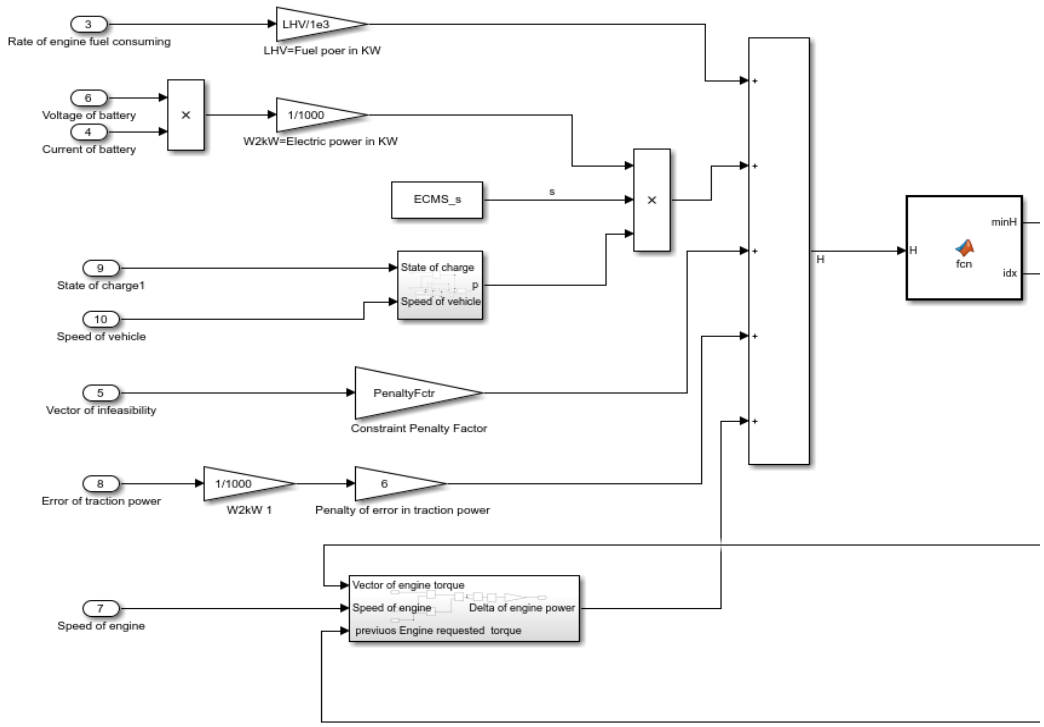
همانگونه که قابل مشاهده است مقدار تابع برای سطح شارژهای بالاتر از سطح شارژ هدف، کمتر از یک است تا کنترلر برای استفاده از پیشران برقی و کاهش سطح شارژ ترقیب شود و همچنین برای سطح شارژهای کمتر از هدف، این مقدار بزرگتر از یک است تا احتمال استفاده از پیشران برقی کاهش یابد یا کنترل کننده به شارژ باتری ترغیب گردد. به طور معمول مقدار a برابر ۱ ۳ یا ۵ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱– تابع نگهدارنده SOC

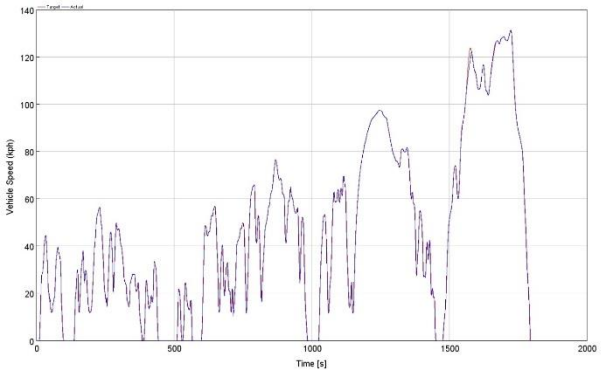
نتایج شبیه‌سازی و کنترل

متناسب با شرایط جاده ای و فرهنگ رانندگی در هر منطقه چرخه‌های رانندگی مختلفی وجود دارد. در این پژوهش عملکرد خودروهای تک‌نیرو و دونیرو در چرخه‌ها WLTC، NEDC و FTP75 بررسی شد. چرخه هماهنگ جهانی آزمون خودروهای سبک (world harmonized light-duty vehicles test procedure) یک چرخه رانندگی تعریف شده به منظور پایش وضعیت مصرف سوخت و آلایندگی خودروهای سبک است. این چرخه یک چرخه جهانی است که در اکثر مطالعات به عنوان مرجع استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی حرکت خودروی بی بار در چرخه WLTC به شرح زیر در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ آورده شده است.

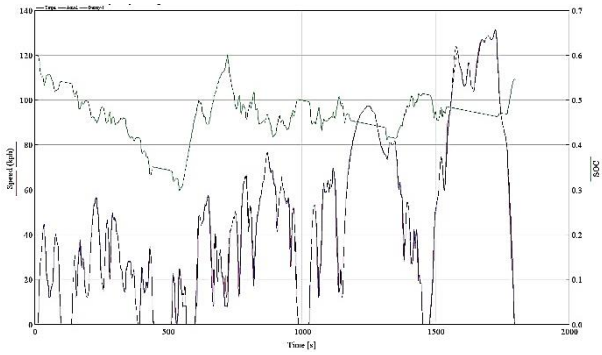


شکل ۱۲– پیاده‌سازی قیود و توابع هزینه معادله همیلتونین در محیط سیمولینک

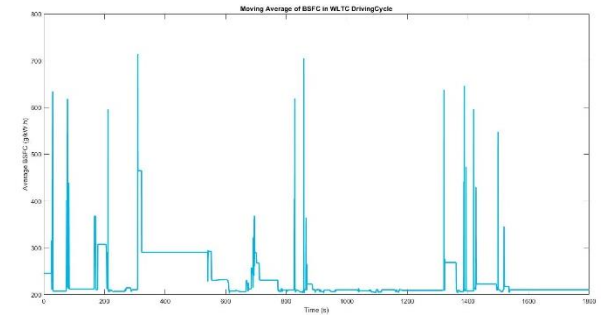
1 Low heat value



شکل ۱۳- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P0 در چرخه WLTC



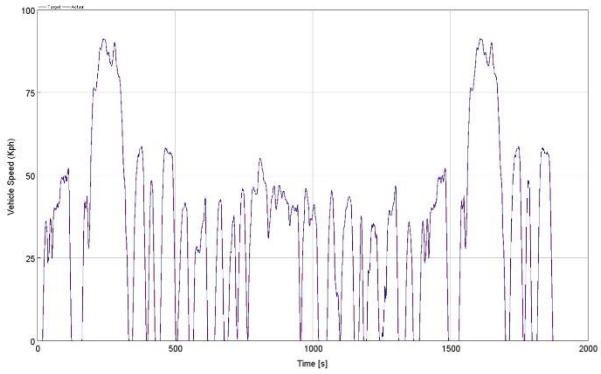
شکل ۱۴- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P2 در چرخه WLTC



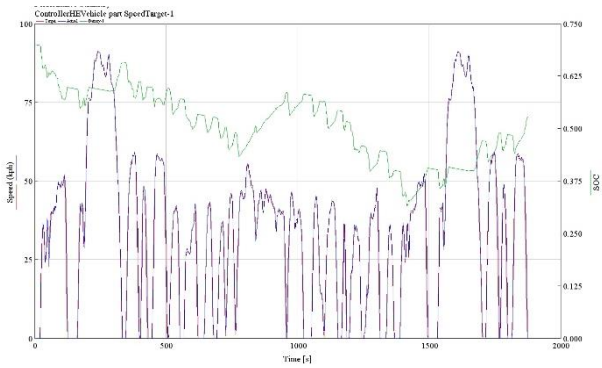
شکل ۱۵- میانگین مصرف سوخت ویژه هنگام شارژ باتری($\bar{A}_{ek}$) تطبیقی) در چرخه WLTC

FTP75یک چرخه آمد و شد شهری است که توسط سازمان محافظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا معرفی شده است و به عنوان مرجع اندازه‌گیری مصرف سوخت و آلایندگی خودروهای سبک مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج این شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۶الی ۱۸ نشان داده شده است.

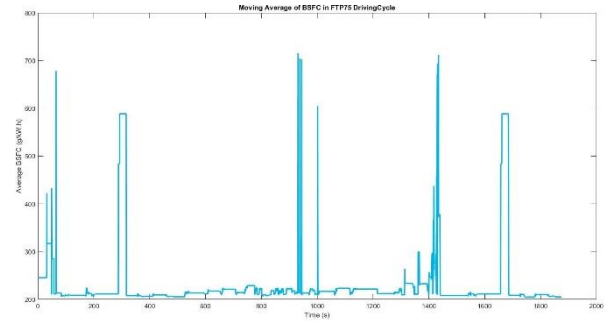
چرخه NEDC نماینده آمد و شد خودروهای اتحادیه اروپا در شهرها است. آخرین به‌روز رسانی آن به سال ۱۹۹۷میلادی بر می‌گردد. با توجه به فعالیت نسبتا بیشتر خودروسازهای اروپایی در کشور ما، این چرخه پرکاربردترین چرخه در حوزه فعالیت‌های صنعتی و پژوهشی است. نتایج شبیه‌سازی در این چرخه در شکل‌های ۱۸-۲۱ نشان داده شده است.



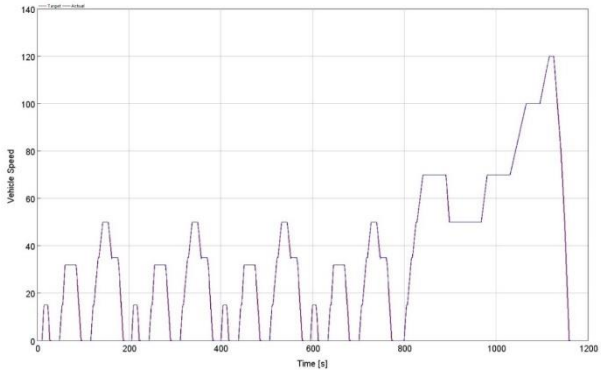
شکل ۱۶- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P0 در چرخه FTP75



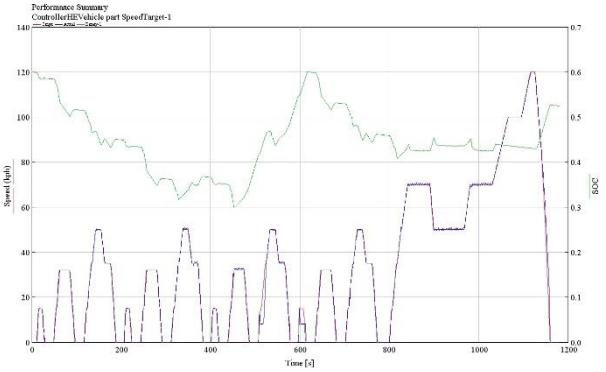
شکل ۱۷- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P2 در چرخه FTP75



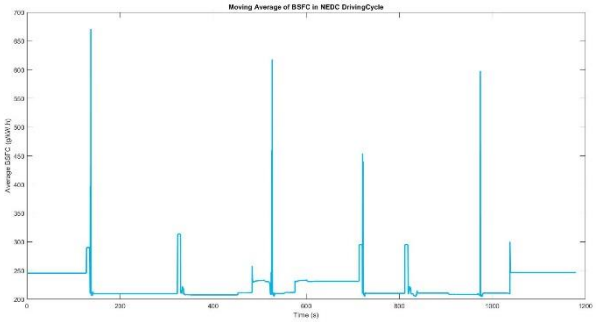
شکل ۱۸- میانگین مصرف سوخت ویژه هنگام شارژ باتری($\bar{A}_{ek}$) تطبیقی) در چرخه FTP75



شکل ۱۹- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P0 در چرخه NEDC



شکل ۲۰- سرعت هدف و واقعی خودرو نیم‌دونیرو P2 در چرخه NEDC



شکل ۲۱-میانگین مصرف سوخت ویژه هنگام شارژ باتری($\bar{A}_{ek}$) تطبیقی) در چرخه NEDC

نتایج مصرف سوخت در چرخه‌های یادشده در جدول ۳ نشان داده شده است:

جدول ۳- مصرف سوخت خودرو در چرخه‌های مختلف

چرخه	WLTC	FTP-75	NEDC
خودرو تک‌نیرو	۶/۳۴	۶/۴۱	۶/۳۸
خودرو دونیرو P0	۶/۰۷	۵/۹۶	۵/۸۶
خودرو دونیروP2	۵/۳۸	۴/۹۱	۵/۰۰

مشاهده می‌شود که خودرو دونیرو P0 نسبت به خودرو تک‌نیرو در تمامی چرخه‌های بررسی شده مصرف سوخت کمتری دارد، همچنین میزان مصرف سوخت در خودرو P2 نسبت به حالت قبل نیز بهبود یافته و تایید می‌کند که استراتژی اعمال شده بر مدل خودرو توانسته است موجب کاهش مصرف سوخت شود. نتیجه حاصل از شبیه‌سازی مدل P0،مصرف سوخت خودرو به میزان ۷ درصد در چرخه FTP-75 و ۴/۲ درصد در چرخه WLTC و ۸ درصد در چرخه NEDC کاهش داد ونتیجه حاصل از شبیه‌سازی مدل P2، کاهش مصرف سوخت به میزان ۱۶، ۲۳/۴ و ۲۳/۲ درصد به ترتیب در چرخه‌های WLTC، FTP75 و NEDC را در پی داشت.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش پیاده‌سازی الگوریتم بهینه سازی در خودرو نیم‌دونیرو P2 است. ابتدا خودرو تک‌نیرو با مشخصاتی مشابه با مشخصات خودروهای داخلی انتخاب گردید. پیشران احتراق داخلی این خودرو دارای بیشینه گشتاور ۱۶۴ نیوتن متر و بیشینه توان خروجی ۷۶ کیلووات است. جرم خودرو ۱۲۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار شناخته شده GT-Suite، عملکرد و مصرف سوخت خودرو تک‌نیرو در چرخه‌های مختلف رانندگی مطالعه گردید. برای بهبود مصرف سوخت خودرو، قوه‌ی محرکه برقی به سامانه تسمه متعلقات آن اضافه شد. طی این تغییر مصرف سوخت خودرو به میزان ۷ درصد در چرخه FTP-75 و ۴/۲ درصد در چرخه WLTC و ۸ درصد در چرخه NEDC کاهش یافت. با توجه به وجود آمد و شد خزشی در سطح کلانشهرهای ایران خصوصا در ساعات شلوغی، خاموش و روشن شدن مداوم پیشران احتراق داخلی علاوه بر افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های مضاعف، باعث کاهش عمر قطعات می‌گردد. به همین منظور راه حل دوم، یعنی شبیه‌سازی خودرو هدف به همراه قوه‌ی برقی متصل به جعبه‌دنده اجرا گردید. برای استفاده بهینه از ظرفیت کاهش مصرف سوخت این ساختار، سعی شد تا تقسیم توان میان پیشران احتراق داخلی و پیشران برقی، بهینه‌سازی گردد. استراتژی به حداقل رساندن مصرف سوخت معادل (ECMS) برای این امر انتخاب شد زیرا علاوه بر بهینه‌سازی مناسب، قابلیت پیاده‌سازی روی خودرو را دارا است. مدل رو به عقب خودرو دونیرو P2 در محیط سیمولینک نرم افزار متلب شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت خودرو نیم‌دونیرو P2 در چرخه‌های WLTC، NEDC و FTP-75 با استفاده از الگوریتم تقسیم توان ECMS، به ترتیب کاهش مصرف سوخت ۱۴/۷، ۲۱/۴ و ۲۳/۱ درصدی را نسبت به خودرو تک‌نیرو نشان می‌دهد. همچنین استفاده از الگوریتم ECMS تطبیقی باعث شد مصرف سوخت خودرو دونیرو نسبت به حالت قبل و در چرخه‌های یاد شده به ترتیب ۰/۴، ۰/۳و ۰/۳ درصد کاهش یابد. در نتایج شبیه‌سازی اندکی نوسان در سرعت خودرو در هنگام روشن شدن پیشران احتراق داخلی مشاهده می‌شود به منظور کاهش نوسانات، بایستی از پیشران احتراق داخلی با فناوری بالاتر و نیروهای مقاوم کمتر استفاده شود. با کاهش ممان اینرسی پیشران احتراق داخلی، نوسانات نیز کاهش می‌یابد. همچنین نحوه اتصال پیشران احتراقی به سامانه انتقال قدرت بایستی کنترل گردد. ضریب کنترلی که در کنترلر خودرو استفاده شده است به صورت تجربی و سعی و خطا بدست آمده‌اند. اگرچه الگوریتم پیاده‌سازی شده، عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد، اما بهینه‌سازی این ضرایب ممکن است موجب کاهش مصرف سوخت گردد. با وجود اینکه از چرخه‌های استاندارد و بین‌المللی برای بررسی عملکرد خودرو استفاده شد؛ اما باید عملکرد دینامیکی خودرو و احساس رضایت مشتری از رانندگی با آن مورد مطالعه قرار بگیرد.

تشکر و قدردانی

گرد آورندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت توسعه قوای محرکه دینا، که امکانات آزمایشگاهی لازم برای انجام این پژوهش را فراهم نمود، اعلام می‌دارند.

مراجع

[1] K. Yoon, J. Hong, and J. Shim, “A Study on Front End Auxiliary Drive(FEAD) System of 48V Mild Hybrid Engine,” Apr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-0414.

[2] S. Lee, J. Cherry, M. Safoutin, A. Neam, J. McDonald, and K. Newman, “Modeling and Controls Development of 48 V Mild Hybrid Electric Vehicles,” Apr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-0413.

[3] N. Denis, M. R. Dubois, J. P. F. Trovao, and A. Desrochers, “Power Split Strategy Optimization of a Plug-in Parallel Hybrid Electric Vehicle,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 315–326, 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2756049.

[4] م. اکبری نوقابی و س. حیدری مزرجی، “بررسی روش بدست آوردن نقطه بهینه عملکرد موتور احتراقی در خودرو هیبرید سری،” *هفتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک،تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر*، ۱۳۹۲.

[5] Z. S. Miandehi, S. V. Hosseini, S. Azadi, M. Reza, and J. Kargar, “A Study on Fuel Consumption Reduction Using 48-V Mild Hybrid Technology,” *ICICE*, pp. 1–8, 2019.

[6] B. Škugor, J. Deur, M. Cipek, and D. Pavkovi, “Design of a power-split hybrid electric vehicle control system utilizing a rule-based controller and an equivalent consumption minimization strategy,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 6, pp. 631–648, 2014, doi: 10.1177/0954407013517220.

[7] W. Enang and C. Bannister, “Robust proportional ECMS control of a parallel hybrid electric vehicle,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 231, no. 1, 2017, doi: 10.1177/0954407016659198.

[8] D. Finkel, “Direct optimization algorithm user guide,” *undefined*, 2003.