فصلنامهٔ علمی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

DOI:10.22034/ER.2022.701022

بهینه‌سازی مصرف سوخت خودرو دورگه سری با استفاده از منطق کنترل فازی

محسن مقیمی[۱]، محمدمهدی تیموری[۲]، ایمان چیت‌ساز[۳*]، میثم صالحی[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، moghimi@me.iut.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، teymoori@me.iut.ac.ir

[۳] عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، i.chitsaz@iut.ac.ir

[۴] واحد نگاشت شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، me_salehi@ip-co.com

* نویسندهٔ مسئول

چکیده

کنترل‌کننده مرکزی خودرو دورگه، زمان راه‌اندازی و خاموش‌شدن موتوراحتراقی، نقاط عملکرد آن، توان مصرفی باتری و میزان احیای انرژی ترمزی را مشخص می‌کند. راهکار کنترلی مدیریت‌کننده مرکزی خودرو دورگه سری، تعیین‌کننده میزان مصرف سوخت جهت تأمین توان مورد نیاز خودرو در هر موقعیت است. در پژوهش حاضر، راهکار کنترلی ترموستات، با استفاده از منطق کنترل فازی طراحی شده و با حالتی که کنترلر مورد استفاده از نوع کلاسیک باشد، از نظر میزان مصرف سوخت مقایسه شده‌است. برای شبیه‌سازی مدل خودرو از نرم‌افزارهای جی‌تی‌پاور و سیمولینک به‌صورت کوپل استفاده شده‌است. مدل عددی ایجادشده در نرم‌افزار، با داده‌های تجربی مقایسه و صحه‌گذاری شده و در چرخه اروپایی مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از منطق کنترل فازی به جای کنترل کلاسیک، ۴ درصد مصرف سوخت خودرو دورگه سری را کاهش می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۱۵ بهمن ۱۴۰۰

پذیرش: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۱

کلیدواژه‌ها:

بهینه‌سازی

خودرو دورگه

منطق فازی

کنترلر

مصرف سوخت

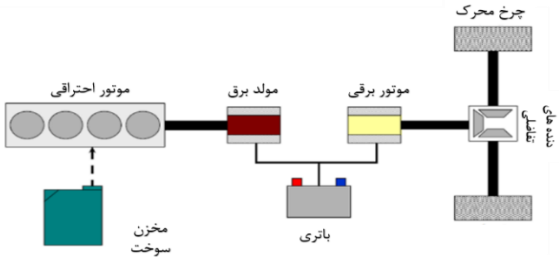
تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

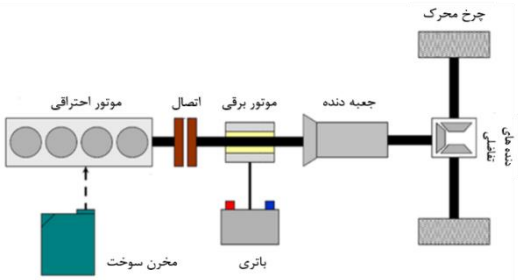
افزایش آلایندگی‌های حاصل از سوخت‌های کربنی و کاهش ذخایر منابع انرژی تجدیدناپذیر، صنعت خودروسازی را به سمت گسترش تکنولوژی ساخت خودروهای کم‌مصرف یا با قابلیت مصرف انرژی جایگزین پیش برد.

اولین جایگزین مناسب برای خودروهای احتراقی معمول، خودروهای برقی بودند، زیرا بازدهی خودروهای برقی بالاتر از خودروهای احتراقی است و می‌توان برق را از طریق منابع تجدیدپذیر تولید کرد. اما دلایلی همچون کم‌بودن انرژی قابل ذخیره در باتری، حجم و وزن بالای باتری و زمان زیاد لازم برای شارژ در این خودروها، توجه خودروسازان را به سمت تولید خودروهای دورگه[1] معطوف کرد [۱].

خودروهای دورگه که ترکیبی از خودروهای برقی و احتراقی هستند مصرف سوخت کم‌تر نسبت به خودروهای احتراقی دارند و بر خلاف خودروهای تمام برقی از باتری‌های کوچک‌تر با زمان شارژ پایین‌تر استفاده می‌کنند و قابلیت پیمایش مسافت بالایی را دارند [۱]؛ همچنین خودروهای دورگه قابلیت بازیافت بخشی از انرژی حرکتی وسیله نقلیه در هنگام شتاب‌گیری منفی و امکان استفاده از سوخت‌ها و موتورهای جایگزین را فراهم می‌کنند. خودروهای دورگه با توجه به ساختار ترکیب منابع انرژی خود، انواع مختلفی دارند که مهمترین آنها عبارتند از ساختار دورگه سری[2]، ساختار دورگه موازی[3] و ترکیب سری و موازی که چینش کلی این سه ساختار در شکل‌های ۱ تا ۳ قابل مشاهده است.

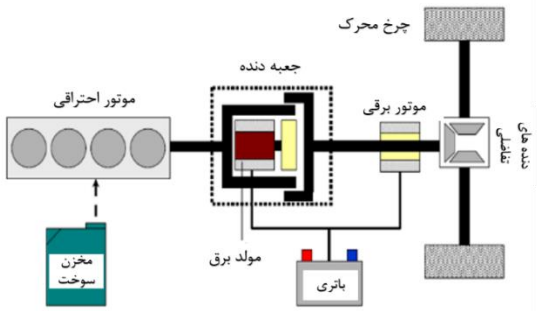


شکل ۱: پیکره‌بندی خودرو دورگه با ساختار سری



شکل ۲: پیکره‌بندی خودرو دورگه با ساختار موازی

[1] Hybrid
[2] Series Hybrid Electric Vehicle
[3] Parallel Hybrid Electric Vehicle



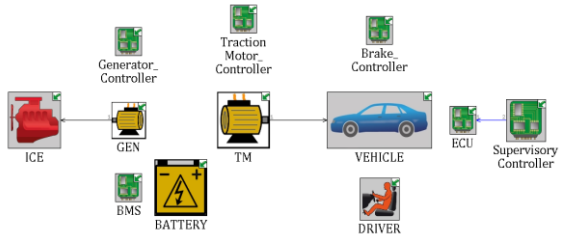
شکل ۳: پیکره‌بندی خودرو دورگه با ساختار سری موازی

در ساختار سری، موتورالکتریکی به‌تنهایی توان خودرو را تأمین می‌کند. هنگامی‌که خودرو ترمز می‌کند، موتورالکتریکی به حالت تولید توان درمی‌آید و این‌بار انرژی حرکتی به‌وسیله منبع ذخیره انرژی بازیابی می‌شود [۲] مخزن سوخت به‌دلیل عملکرد برگشت‌ناپذیر موتوراحتراقی، منبع مصرف‌شدنی محسوب می‌شود [۳]. در بعضی از خودروهای دورگه سری، باتری علاوه بر قابلیت شارژ ازطریق موتور-ژنراتور، قابلیت شارژ با منبع برق خارجی را نیز دارد [۴]؛ همچنین در بعضی نمونه‌ها بیش از یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. به‌طور مثال، استفاده از یک سوپر خازن در کنار باتری می‌تواند باعث جذب بیشینه توان حاصل از شارژ و دشارژ باتری شود [۵]. هنگامی‌که تغییرات توان در مدار الکتریکی سریع است، باتری به‌سرعت به تغییرات پاسخ می‌دهد پس حتی اگر موتوراحتراقی برای کار در چند نقطه تنظیم شود نرخ تغییرات توان موتوراحتراقی پایین خواهدبود و موتوراحتراقی در نقاط عملکرد تنظیم‌شده کار می‌کند زیرا باتری می‌تواند تا حد زیادی ناپایداری‌های تقاضای توان را جبران‌کند [۶]. اگرچه تولید خودروهای دورگه هنوز با موانعی چون قیمت بالا، طراحی بهینه، کنترل سیستم و مدیریت انرژی مواجه است؛ اصلی‌ترین مسئله در توسعه خودروهای دورگه هماهنگی بین منابع چندگانه انرژی و مبدل‌هاست [۷]؛ به‌علاوه افزایش طول عمر اجزایی مانند باتری یکی از فاکتورهای قابل توجه در هنگام طراحی است. راهکار کنترلی که در کنترل‌کننده مرکزی خودروها به کار می‌رود به شکل یک الگوریتم یا قانون کلی برای تنظیم عملکرد خودرو می‌باشد. به‌طور کلی ورودی‌های این الگوریتم‌ها مقادیر مشخص‌کننده نقاط کاری خودرو مانند سرعت، گشتاور مورد نیاز، نوع جاده و اطلاعات ترافیک هستند. خروجی راهکار کنترلی، خاموش یا روشن‌بودن اجزا یا نقاط عملکرد هر یک از آن‌هاست. در خودروهای دورگه سری، موتور احتراقی به دلیل متصل‌نبودن به چرخ‌های محرک، در بهترین نقاط عملکردی خود کار می‌کند که منجر به کاهش مصرف سوخت خودرو نسبت به خودروهای دورگه موازی خواهد شد. این نوع خودرو به‌دلیل ساختار ساده و نداشتن جعبه‌دنده چندسرعته، ارزان‌تر از گونه سری-موازی و موازی نیز می‌باشد. اصلی‌ترین چالش در رابطه با خودرو دورگه سری، طراحی سامانه مدیریت انرژی و تنظیم ارتباط بین

اجزای مختلف جهت به حداقل‌رساندن مصرف سوخت است که در پژوهش حاضر به این موضوع پرداخته می‌شود [۷]. مطرح‌ترین راهکارهای کنترلی در خودروهای دورگه سری، راهکار ترموستات[۱]، راهکار پیروتوان[۲] و راهکار بیشینه سطح شارژ باتری[۳] می‌باشد؛ در راهکار ترموستات عملکرد موتور- ژنراتور به‌طور کامل توسط سطح شارژ باتری کنترل می‌شود [۸]. مهیدین و همکاران [۹] مصرف سوخت خودرو دورگه سری با راهکار کنترلی پیروتوان به همراه منطق فازی را در سه حالت توابع عضویت مختلف "گاوسین"[۴]، "مثلثی"[۵] و "ذوزنقه‌ای"[۶] مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از توابع عضویت مثلثی بهترین میزان مصرف سوخت را حاصل می‌کند. جیانپینگ‌گائو و همکاران [۱۰] با بررسی هر سه راهکار کنترلی ترموستات، پیروتوان و بیشینه سطح شارژ باتری بر روی یک اتوبوس دورگه نشان دادند که راهکار ترموستات موجب بهترین بازده در موتور- ژنراتور و کم‌ترین بازده در کل سامانه می‌شود. نخستین نمونه تجاری خودرو دورگه سری، بی‌ام‌و آی۳[۷] نام دارد که برای اولین بار در سپتامبر ۲۰۱۳ معرفی و عرضه شد اما با وجود مصرف سوخت بسیار کمِ ۱٫۹ لیتر در صد کیلومتر، به علت قیمت بالا و ابعاد کوچک خودرو چندان مورد اقبال مشتریان قرار نگرفت. سه سال بعد در نوامبر ۲۰۱۶ موفق‌ترین خودرو دورگه سری تجاری توسط شرکت نیسان معرفی و عرضه شد. این خودرو که لقب پرفروش‌ترین خودروی شهری سال ۲۰۱۷ در ژاپن را به خود اختصاص داده نیسان نوت ای پاور[۸] نام دارد [۱۱] که از یک موتور سه سیلندر ۱٫۲ لیتری بهره می‌برد [۱۲]. مصرف سوخت این خودرو در چرخه ترکیبی ژاپن معادل ۲٫۹۴ لیتر در صد کیلومتر است [۱۱]. کنترل‌کننده مرکزی، زمان روشن و خاموش‌شدن موتوراحتراقی، مشخصات نقطه عملکرد موتور احتراقی شامل سرعت و گشتاور، میزان توان مصرفی باتری و میزان احیای انرژی ترمزی را تعیین می‌کند و مطابق راهکار کنترلی که در آن به کار رفته است، فرمان‌های لازم را به واحد کنترل موتور احتراقی، سیستم ترمز، موتورالکتریکی و باتری ارسال می‌کند. برای کنترل خودروهای دورگه سری به‌طور عمده سه راهکار کنترلی ترموستات، پیروتوان و بیشینه سطح شارژ باتری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی مصرف سوخت یک خودرو دورگه سری با استفاده از راهکار کنترلی ترموستات در قالب منطق کنترل فازی مدنظر می‌باشد. در انتها با اعمال راهکار کنترلی ترموستات بر کنترل کلاسیک نیز نتایج را محاسبه و با نتایج مربوط به منطق فازی مقایسه می‌کنیم. منظور از کنترل کلاسیک، کنترل مبتنی بر دستور می‌باشد. در این پژوهش برای نخستین بار، منطق فازی بر روی خودرو ملی که مدل آن صحه‌گذاری شده، پیاده‌سازی شده است؛ همچنین مصرف سوخت خودرو در حالت‌های مختلف کنترلی محاسبه و با هم مقایسه شده است.

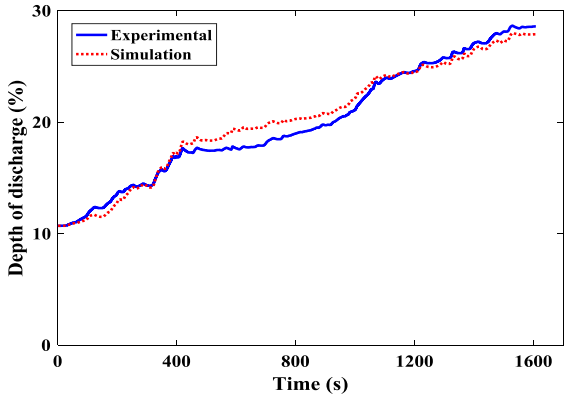
۲- شبیه‌سازی و صحه‌گذاری مدل خودرو

جهت مقایسه میزان مصرف سوخت راهکارهای کنترلی معرفی‌شده در فصل قبل، مدل عددی خودرو دروگه رانا با ساختار سری در نرم‌افزار جی‌تی پاور[۹] مطابق شکل ایجاد شد. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی عملکرد خودرو در چرخه‌های رانندگی مختلف، محاسبه مصرف سوخت، آلایندگی، اتلاف انرژی و تغییرات سطح شارژ باتری استفاده می‌شود. ورودی‌های نرم‌افزار شامل تمامی مشخصات هر جزء مانند اندازه، نقاط عملکردی، نوع و بازده می‌باشد.



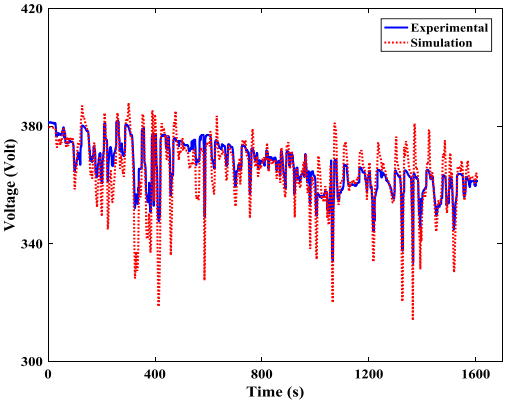
شکل ۴: مدل عددی خودرو دورگه سری

جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی خودرو رانا دورگه سری، نتایج یک آزمون تجربی بر روی خودرو رانا دورگه سری در سطح شهر تهران، با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در شرایط مشابه مقایسه شد. در شکل‌های ۵ تا ۸ نتیجه مقایسه میزان تخلیه شارژ باتری، ولتاژ و جریان باتری و توان موتور الکتریکی در هر لحظه مشاهده می‌شود.

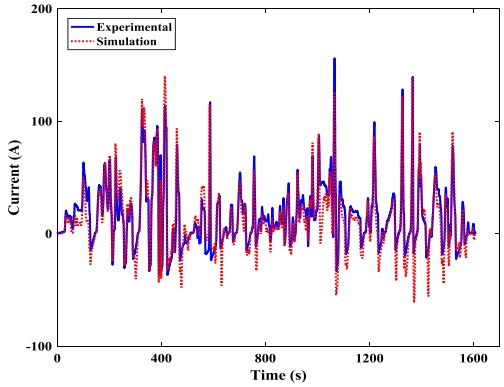


شکل ۵: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی میزان تخلیه شارژ باتری

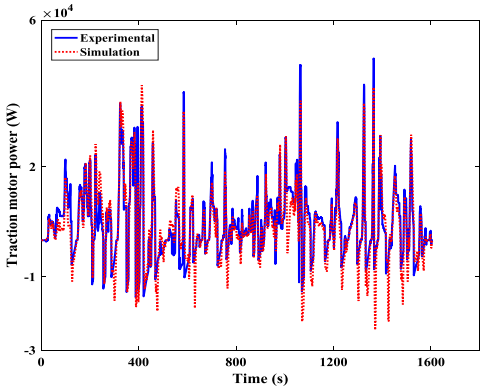
[1] Thermostat Control Strategy
[2] Power Follower Control Strategy
[3] Max "State Of Charge" Control Strategy
[4] Gaussian
[5] Triangular
[6] Trapezoidal
[7] BMW i3
[8] Nissan Note E-Power
[9] GT-Power



شکل ۶: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی ولتاژ باتری



شکل ۷: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی جریان باتری



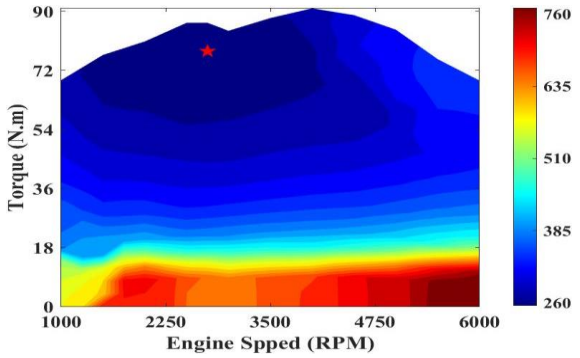
شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی توان لحظه‌ای موتور الکتریکی

۳- پیاده‌سازی کنترلر فازی و کلاسیک بر راهکار ترموستات

همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، در این پژوهش راهکار کنترلی ترموستات در قالب منطق کنترل فازی به کار گرفته شده است؛ مزیت استفاده از منطق کنترل فازی نسبت به کنترل کلاسیک، جلوگیری از روشن و خاموش‌شدن مکرر موتوراحتراقی، یکنواخت کارکردن آن و کاهش استهلاک اجزای خودرو می‌باشد که این سه عامل می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت خودرو دورگه سری شود. در کنترل موتور احتراق داخلی به روش ترموستات با رسیدن سطح شارژ باتری به حد پایینی، موتور روشن شده و باعث تولید توان می‌شود. توان تولیدشده توسط موتور احتراق داخلی از نوع مکانیکی است و این توان توسط یک ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل شده و توسط الکتروموتور مصرف می‌شود. اگر توان الکتریکی تولیدشده توسط ژنراتور بیشتر از توان درخواستی الکتروموتور جهت حرکت خودرو باشد، توان اضافی در باتری ذخیره می‌شود. پس از روشن‌شدن موتور احتراق داخلی سطح شارژ باتری به‌آرامی افزایش می‌یابد تا به حد بالایی برسد. پس از رسیدن سطح شارژ به حد بالایی موتور احتراق داخلی خاموش شده و تا رسیدن سطح شارژ به حد پایینی خاموش می‌ماند. در این پژوهش حد پایینی شارژ باتری ۱۵ درصد و حد بالایی ۸۵ درصد در نظر گرفته شده است. کنترل فازی جهت کنترل دور موتور[1]، گشتاور[2] و درصد باز بودن دریچه گاز موتور هنگامی‌که موتور روشن است به کار می‌رود. در این پژوهش برای یافتن راهکار کنترلی مناسب، ابتدا از کنترل کلاسیک و سپس از دو رویکرد متفاوت منطق کنترل فازی استفاده شده؛ همچنین مصرف سوخت و ویژگی‌های این سه روش کنترلی با هم مقایسه شده است.

۳-۱- روش اول: عملکرد موتور در نقطه بهینه (کنترل کلاسیک)

در این روش، موتور احتراقی در کل چرخه تنها در یک نقطه (بهینه‌ترین نقطه عملکردی موتور) روشن می‌ماند. این نقطه از موتور دارای کمترین مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی[3] می‌باشد. در این روش دور موتور و گشتاور در نقطه کمینه bsfc که از نقشه مربوطه استخراج‌شده انتخاب می‌شود و موتور در این نقطه روشن می‌ماند تا سطح شارژ باتری از سطح پایینی به سطح بالایی برسد. با توجه به این‌که در این روش موتور در یک نقطه عملکردی یکتا روشن است، کنترل فازی در این روش کاربردی ندارد و توان تولیدی موتور احتراقی در کل زمان روشن‌بودن، ثابت است. نقطه بهینه موتور در نقشه مصرف سوخت ویژه ترمزی در شکل ۹ نمایش داده شده است.

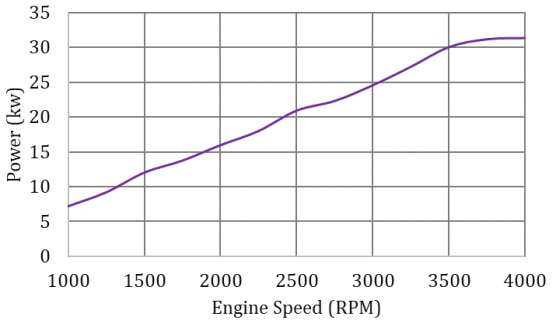


شکل ۹: بهترین نقطه موتور از نظر مصرف سوخت ویژه ترمزی

[1] Engine speed
[2] Torque
[3] Brake specific fuel consumption (bsfc)

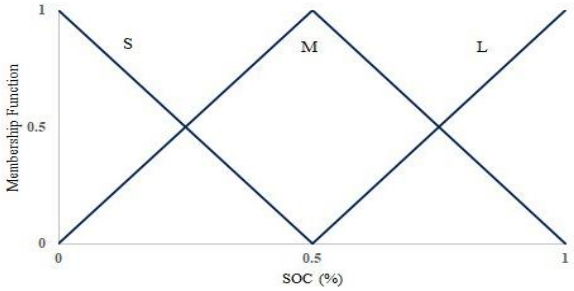
۳-۲- روش دوم: عملکرد موتوراحتراقی بر خط بهینه و کنترل یک متغیره (کنترل فازی)

در این روش یک خط بهینه از نقشه bsfc موتور بر حسب دور موتور و توان موتور استخراج می‌شود (شکل). این خط از دور موتور ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، نقاطی که دارای کمترین مقدار bsfc هستند را شامل می‌شود. در این روش نیز، هنگامی‌که سطح شارژ باتری به سطح پایینی می‌رسد، موتور احتراقی روشن می‌شود. در این رویکرد نقاط عملکردی موتور بر اساس سطح شارژ باتری طوری مشخص می‌شود، به‌طوری‌که اگر سطح شارژ باتری در سطح پایینی باشد، نقطه عملکردی موتور بر خط بهینه طوری انتخاب می‌شود که توان تولیدی بیشترین مقدار باشد.

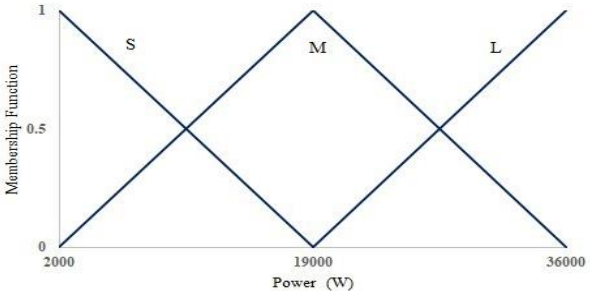


شکل ۱۰: نمودار خط بهینه مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور

در ادامه و با افزایش سطح شارژ، دور موتور کاهش یافته و توان تولیدی آن کاهش می‌یابد و با رسیدن سطح شارژ به ۸۵ درصد، موتور خاموش می‌شود. توان تولیدی موتور توسط کنترل فازی در سیمولینک محاسبه شده و به نرم‌افزار جی‌تی‌پاور ارسال می‌شود. در این روش تمام نقاط عملکردی موتور بر روی خط بهینه قرار دارد و توسط سطح شارژ باتری، مقدار آن کنترل می‌شود. نمودار خط بهینه عملکرد موتور در شکل و نمودار توابع عضویت کنترل فازی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. همچنین، در جدول ۱ نحوه تعریف قوانین[1] کنترل فازی توانِ تولیدی موتور نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تابع عضویت کنترلر فازی در نرم‌افزار سیمولینک برای سطح شارژ باتری (ورودی کنترلر)



شکل ۱۲: تابع عضویت کنترلر فازی در نرم‌افزار سیمولینک برای توان تولیدی موتور احتراقی (خروجی کنترلر)

جدول ۱: قوانین استفاده‌شده جهت کنترل توان تولیدی موتور در کنترلر فازی نرم‌افزار متلب

توان تولیدی موتور احتراقی	سطح شارژ باتری
زیاد	کم
متوسط	متوسط
کم	زیاد

۳-۳- روش سوم: عملکرد موتور احتراق داخلی بر خط بهینه و کنترل دو متغیره

در این روش نیز از خط بهینه مصرف سوخت ویژه ترمزی برای نقاط عملکردی موتور استفاده می‌شود با این تفاوت که در کنترل فازی، توان تولیدی موتور این بار بر حسب دو ورودی سطح شارژ و توان درخواستی الکتروموتور کنترل می‌شود. نمودار توابع عضویت کنترلر فازی در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نمایش داده شده است. همچنین، در جدول ۲ قوانین مربوط به کنترل توان تولیدی موتور احتراقی مشخص شده‌است.

جدول ۲: نحوه کنترل فازی توان تولیدی موتور احتراقی بر حسب توان درخواستی و سطح شارژ باتری

	توان درخواستی			
سطح شارژ	کم	متوسط	زیاد	
	کم	کم	متوسط	زیاد
	متوسط	کم	متوسط	متوسط
	زیاد	کم	کم	متوسط

٤- بحث بر روی نتایج

مصرف سوخت خودروهای دورگه که چرخه اروپایی[2] را طی می‌کنند، طبق استاندارد با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود [۱۳].

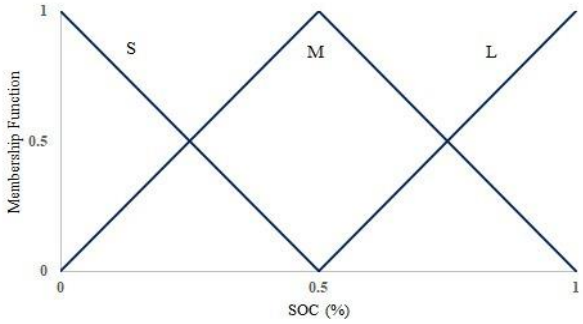
$$C = \frac{D_e . C_1 + D_{av} . C_2}{D_e + D_{av}} \quad (۱)$$

در این معادله D_e مقدار مسافتی است که خودرو با شارژ کامل می‌تواند طی کند تا شارژ آن کامل تخلیه شود. این عدد برای خودروی رانا هیبرید برابر ۷۷ کیلومتر می‌باشد. همچنین D_{av} طبق

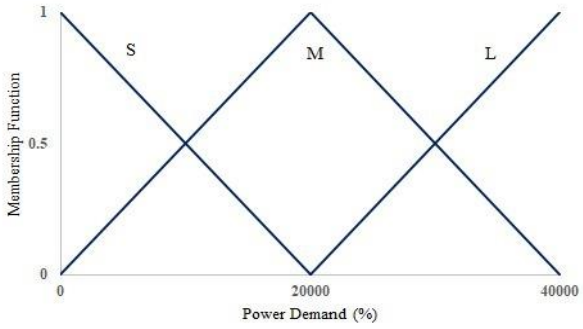
[1] Rules

[2] New European Driving Cycle (NEDC)

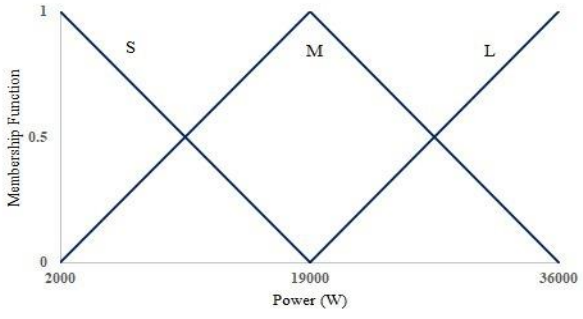
استاندارد برای چرخه اروپایی برابر ۲۵ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. C_1 در این معادله مصرف سوخت موتور در حالتی است که باتری تا سطح شارژ بیشینه شارژ شده باشد و خودرو یک چرخه اروپایی را طی کند. همچنین C_2 مقدار مصرف سوخت موتور هنگامی است که خودرو یک چرخه اروپایی را طی کند و سطح شاژ باتری در حد پایینی ثابت باقی بماند. نمودار سرعت بر حسب زمان چرخه اروپایی در شکل نمایش داده شده است. در این پژوهش هنگامی‌که سطح شارژ در بالاترین مقدار باشد، با طی یک چرخه اروپایی، سطح شارژ باتری تا حد پایینی کاهش نیافته و موتور احتراقی روشن نمی‌شود در نتیجه C_1 برابر صفر است.



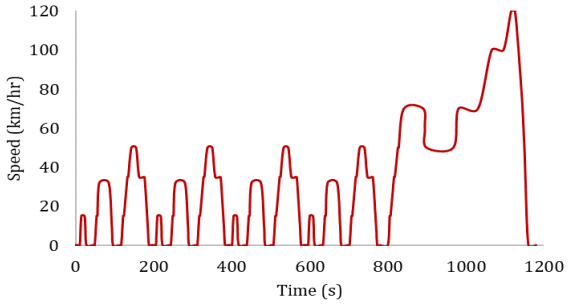
شکل ۱۳: تابع عضویت کنترلر فازی در نرم‌افزار سیمولینک برای سطح شارژ باتری (ورودی کنترلر)



شکل ۱۴: تابع عضویت کنترلر فازی در نرم‌افزار سیمولینک برای توان درخواستی (ورودی کنترلر)

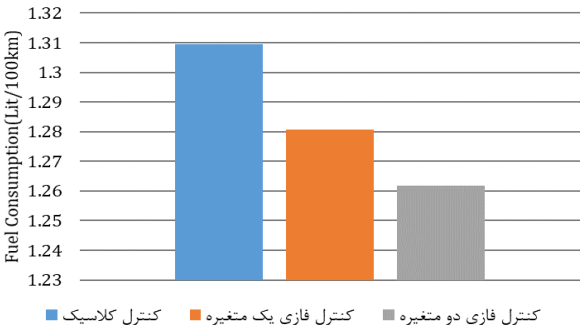


شکل ۱۵: تابع عضویت کنترلر فازی در نرم‌افزار سیمولینک برای توان تولیدی موتور احتراقی (خروجی کنترلر)



شکل ۱۶: نمودار سرعت- زمان چرخه اروپایی

مقدار مصرف سوخت موتور در هر روش کنترلی که در قسمت قبل توضیح داده‌شده در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۷: مصرف سوخت خودرو با روش‌های کنترل فازی مختلف بر حسب لیتر بر صد کیلومتر

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است، مقدار مصرف سوخت در روش سوم که از کنترلر فازی دومتغیره استفاده شده است، کمترین مقدار می‌باشد. کاهش مصرف سوخت در روش سوم به این دلیل است که در این روش توان تولیدی توسط موتور احتراقی به‌وسیله توان مصرفی الکتروموتور کنترل شده و توان به مقدار نیاز توسط موتور احتراقی تولید می‌شود و درصد کمی از توان تولیدی در باتری ذخیره می‌شود. لازم به ذکر است اگر توان ذخیره‌شده در باتری زیاد باشد، به دلیل مقاومت‌های داخلی باتری هنگام شارژ و تخلیه شارژ، مقدار زیادی از توان تولیدشده تلف می‌شود؛ در نتیجه در طراحی کنترلر فازی تلاش بر این بوده که تا حد امکان توان تولیدی ژنراتور و توان مصرفی موتور الکتریکی هم‌اندازه شوند. در روش دوم نیز با توجه به عملکرد موتور احتراقی در دور موتور پایین‌تر پس از افزایش سطح شارژ باتری، مصرف سوخت نسبت به روش اول که موتور تنها در یک نقطه کار می‌کند کمتر است. از دیگر مزایای روش سوم نسبت به دو روش دیگر می‌توان به کاهش سر و صدا و ارتعاش موتور احتراق داخلی هنگامی‌که توان تولیدی الکتروموتور کم می‌باشد یا خودرو متوقف است اشاره کرد. میزان مصرف سوخت در حالت فازی دومتغیره نسبت به کلاسیک ۴ درصد کاهش نشان می‌دهد که در مقیاس کلان عدد قابل‌توجهی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

کنترل‌کننده مرکزی خودرو دورگه، زمان روشن و خاموش‌شدن موتوراحتراقی، نقاط عملکرد آن، مقدار توان باتری و میزان احیای انرژی ترمزی را مشخص می‌کند. راهکار کنترلی کنترل‌کننده مرکزی خودرو دورگه الکتریکی، تعیین‌کننده میزان مصرف سوخت جهت تأمین توان مورد نیاز خودرو در هر موقعیت است. در پژوهش حاضر، راهکار کنترلی ترموستات با استفاده از دو رویکرد متفاوت کنترل فازی طراحی شده و با حالتی که کنترلر مورد استفاده از نوع کلاسیک باشد، از نظر میزان مصرف سوخت مقایسه شده است. نتایج نشان داد مصرف سوخت خودرو به‌شدت به نحوه کنترل آن وابسته است و اگر نقاط عملکردی موتور روی خط بهینه باشد و توان تولیدی موتور توسط دو متغیر سطح شارژ باتری و توان درخواستی کنترل شود، کمترین میزان مصرف سوخت را خواهیم داشت. در صورت استفاده از کنترلر فازی دومتغیره و تک‌متغیره، به ترتیب ۴ و ۱,۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت نسبت به حالتی که موتور تنها در یک نقطه کار می‌کند، مشاهده می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو اعلام می‌دارند.

فهرست علائم

مصرف سوخت، $\frac{lit}{100km}$	C
مسافت، m	D

زیرنویس‌ها

میانگین	av
بازه‌ی الکتریکی	e

مراجع و منابع

[1] C. Mi, M. A. Masrur, and D. W. Gao, Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives, Hybrid Electr. Veh. Princ. Appl. with Pract. Perspect., 2011
[2] A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, Optimal energy management in series hybrid electric vehicles, American Control Conference, 2000
[3] L. V. Pérez and E. A. Pilotta, Optimal power split in a hybrid electric vehicle using direct transcription of an optimal control problem, Mathematics and Computers in Simulation, 2009
[4] J. Torres, R. Gonzalez, A. Gimenez, and J. Lopez, Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study, Applied Energy, 2014.
[5] Shabbir W., Control strategies for series hybrid electric vehicles. PhD thesis, Imperial College London, 2015
[6] H. Yoo, S.-K. Sul, Y. Park, and J. Jeong, System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries, IEEE Transactions on Industry Applications, 2008
[7] S. Di Cairano, W. Liang, I. V. Kolmanovsky, M. L. Kuang, and A. M. Phillips, Engine power smoothing energy management strategy for a series hybrid electric vehicle, American Control Conference, 2011
[8] S. E. G. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2005.
[9] S.H.Mahyiddin et al., Fuzzy logic energy management system of series hybrid electric vehicle, IET Conf. Publ., 2016
[10] J. Gao, F. Sun, H. He, G. G. Zhu, and E. G. Strangas, A comparative study of supervisory control strategies for a series hybrid electric vehicle, Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf., 2009
[11] https://global.nissannews.com/en/releases/.
[12] http://www.woodfieldnissan.com/blog/nissan-set-to-spread-the-note-e-power-across-the-sea/.
[13]https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-PHEV_ICCT-Briefing-Paper_280717

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir
DOI:10.22034/ER.2022.701022

Fuel consumption optimization of a series hybrid electric vehicle utilizing fuzzy logic control

M. Moghimi [1], M. M. Teymoori[2], I. Chitsaz[3*], M. Salehi[4]

[1] *MSc Student, Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, moghimi@me.iut.ac.ir*
[2] *MSc Student, Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, teymoori@me.iut.ac.ir*
[3] *Faculty of Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, i.chitsaz@iut.ac.ir*
[4] *Calibration department of Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, me_salehi@ip-co.com*

[*] *Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 04 February 2022
Accepted: 19 May 2022

Keywords:
Optimization
Series hybrid vehicle
Fuzzy logic
Controller
Fuel consumption

ABSTRACT

The controller of the hybrid electric vehicle determines the combustion engine start–stop time, the operation points, and regenerative brake energy. The Controlling approach of hybrid electric vehicles controls the amount of needed fuel in every driving situation. In the present study, the thermostat strategy is implemented along with fuzzy logic control and compared to the classic thermostat strategy. The fuel consumption is compared in two different strategies. GT-power and Simulink software are implemented to simulate the series hybrid electric model. The numerical model is compared and validated with experimental data. The validated numerical model calculates the vehicle fuel consumption in the new European driving cycle. Results show that the use of fuzzy logic control reduces the fuel consumption of series hybrid electric vehicle 4 percent compared to the classical control strategy.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.