مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۴-۱

بهبود مدیریت انرژی در خودروی هیبرید الکتریکی موازی به روش برنامه‌ریزی پویا با استفاده از مدل الکتریکی-گرمایی باتری

مجتبی حسن زاده[۱]، زهرا رحمانی [۲]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، m.hassanzadeh@stu.nit.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، zrahmani@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷ ویرایش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

چکیده: در این مقاله، روشی برای مدیریت انرژی آفلاین در خودروهای هیبرید الکتریکی با ساختار موازی پیشنهاد شده است. داشتن یک سیستم مدیریت انرژی مناسب برای تقسیم گشتاور موردنیاز بین موتورهای الکتریکی و درونسوز برای این خودروها ضروری است. باتری خودروهای هیبرید الکتریکی یکی از اساسی‌ترین اجزای این خودروها است. سلامت باتری تأثیر زیادی بر عملکرد کلی خودرو دارد، و میزان شارژ و دمای بالای باتری مهمترین عوامل تشدید فرسودگی آن می‌باشند. در اکثر مطالعات در بحث مدیریت انرژی، حالت شارژ باتری مهمترین متغیر آن و معمولاً تنها متغیر دینامیک سیستم است و دمای باتری برای سادگی ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله ابتدا با استفاده از برنامه‌ریزی پویا و بدون در نظر گرفتن تغییرات دمای باتری، مدیریت انرژی یک خودوری هیبرید الکتریکی موازی انجام می‌شود. سپس با مدل‌سازی سیستم خنک کننده باتری خودرو، مدل خودرو به منظور مشاهده تغییرات دما بهبود داده شده و نشان داده می‌شود که ثابت در نظر گرفتن دمای باتری غیر عملی است. سپس با افزودن دمای باتری به عنوان متغیر حالت دوم به مسئله بهینه‌سازی، روشی برای مدیریت انرژی خودروهای هیبرید الکتریکی با کنترل محدوده تغییرات دمای باتری به همراه کنترل تغییرات حالت شارژ پیشنهاد می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی بر روی مدل خودروی مورد مطالعه نشان می‌دهند که در روش پیشنهادی شارژ و دمای باتری بصورت همزمان کنترل شده و به این ترتیب در روش مدیریت انرژی پیشنهادی از افزایش کنترل‌نشده دمای باتری جلوگیری می‌شود و سرعت فرسودگی آن کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی پویا، خودروهای هیبرید الکتریکی، دمای باتری ، مدیریت انرژی ، مدیریت گرمایی.

Improving the Energy Management of Parallel Hybrid Electric Vehicle by Dynamic Programming Using Electro-Thermal Model of Battery

Mojtaba Hassanzadeh, Zahra Rahmani

Abstract: In this paper, an offline energy management system (EMS) is proposed for parallel hybrid electric vehicles (HEVs). The proper energy management system is necessary for dividing torque between electrical motor and Internal Combustion Engine (ICE). The battery is a crucial component of hybrid electric vehicles and affects significantly the cost and the performance of the whole vehicle. The primary factors accelerating battery aging are high temperatures and high states of charge (SOC) of the battery. SOC is the most important state variable in EMS, and usually considered as the only dynamic variable in past researches, but the battery temperature is often considered to be constant for simplicity and the effects of EMS on the temperature variations are

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

neglected. In this paper, first, dynamic programming is applied to a parallel HEV without considering variation of the temperature of the battery. Then, the model of battery is improved by modelling the cooling system to take into account temperature variations and show how neglecting thermal dynamics of the battery in EMS is impractical. Finally, by integrating the battery temperature as a state variable in the optimization problem, a new energy management strategy controlling variations of the battery temperature and SOC is proposed. The simulation results on tested vehicle show that in the proposed method charge and temperature of the battery is controlled so that the proposed EMS method prevents uncontrolled variations of the battery temperature and reduces the degradation rate of it.

Keywords: Battery Temperature, Dynamic Programming, Energy Management, Hybrid Electric Vehicles, Thermal Management.

۱- مقدمه

دو سوم از مواد نفتی مصرفی در دنیا توسط خودروها مصرف می‌شود که حدود نیمی از این مقدار مربوط به خودروهای سواری می‌باشد. آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت و وابستگی به منابع خارجی انگیزه تحقیقات و پیشرفت‌های زیادی در زمینه جایگزینی سیستم‌های تولید و انتقال نیروی[1] متداول مبتنی بر موتور درونسوز[2] با منابع تجدیدپذیر و پاک شده است. از طرفی قدرت خودروهای الکتریکی خالص، به علت هزینه زیاد و ظرفیت کم باتری‌های فعلی، جوابگوی نیازهای عمومی به جز برای کاربردهای خاص نیست. در نتیجه یکی از انگیزه‌های اصلی تولید خودروهای هیبرید الکتریکی[3] بهره بردن از قدرت بالای خودروهای معمولی و آلایندگی ناچیز خودروهای الکتریکی بوده است [۱] .

خودروهای هیبرید الکتریکی دارای دو مسیر برای تأمین نیروی رانشی خود شامل مسیر مخزن سوخت و موتور درونسوز، و مسیر موتور الکتریکی و باتری می‌باشند. مهمترین مسئله قابل توجه مهندسان کنترل در این خودروها، مسئله مدیریت انرژی یا کنترل نظارتی است. عملکرد مناسب خودروهای هیبرید الکتریکی صرف نظر از نوع ساختار و ویژگی‌های اجزای مختلف، به مقدار زیادی وابسته به سیستم مدیریت انرژی است. الگوریتم کنترلی مدیریت انرژی در خودروهای هیبرید مشخص می‌کند که برای دنبال کردن یک سیکل رانندگی[4]، توان یا گشتاور درخواستی راننده چگونه بین واحدهای الکتریکی و گرمایی خودرو تقسیم شود، به‌طوری‌که مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها حداقل، و نیازهای رانندگی برآورده شود [۱ و ۲].

در دو دهه اخیر روش‌های مختلفی برای مدیریت انرژی این خودروها ارائه شده است [۷-۱]. از دیدگاه تئوری کنترل، روش‌های مدیریت انرژی به دو دسته مبتنی بر قواعد و مبتنی بر کنترل بهینه تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر قواعد اگرچه ساده‌تر هستند، اما پاسخ بهینه از آنها حاصل نمی‌شود و برای به دست آوردن پاسخ بهینه کلی از روش‌های مبتنی بر کنترل بهینه استفاده می‌شود [۱].

یک دسته‌بندی رایج در روش‌های مبتنی بر کنترل بهینه تقسیم آنها به روش‌های آفلاین و آنلاین می‌باشد. فرض مشترک همه روش‌های آفلاین، مشخص بودن همه شرایط جاده و رانندگی است. این فرض لازمه رسیدن به پاسخ بهینه کلی است. اگرچه روش‌های آفلاین به دلیل زمان محاسبات زیاد و فرض مشخص بودن شرایط و داشتن محاسبات بازگشتی مستقیماً برای کنترل آنلاین خودروها قابل اجرا نیستند، اما می‌توان از پاسخ آنها به عنوان معیاری برای بهترین عملکرد قابل حصول به منظور مقایسه روش‌های آنلاین و همچنین برای تعریف مسیرهای مرجع در حالت آنلاین استفاده کرد. در روش‌های آنلاین معمولاً یک تابع هزینه لحظه‌ای حداقل می‌شود. بنابراین همه روش‌های آنلاین زیر- بهینه هستند و معیار سنجش آنها نزدیکی به نتایج بهینه کلی است که با روش‌های آفلاین به دست می‌آید. روش‌های آنلاینی که فقط از اطلاعات لحظه‌ای استفاده می‌کنند، پاسخی دور از پاسخ بهینه دارند. روش‌هایی هم که از شناسایی الگو و پردازش اطلاعات ذخیره شده قبلی استفاده می‌کنند، شدیداً وابسته به شرایط و سیکل رانندگی که برای آن طرحی شده‌اند هستند و برای سیکل‌های رانندگی دیگر پاسخ مناسبی ندارند [۱ و ۸]. مهمترین روش‌های مبتنی بر کنترل بهینه، برنامه‌ریزی پویا[5] (DP) [۳ و ۹] برای مدیریت انرژی آفلاین و اصل حداقل پونتریاگین[6] (PMP) [۴ و ۹] برای مدیریت انرژی آنلاین می‌باشد [۸].

در روش مدیریت انرژی استاندارد تابع هزینه میزان مصرف سوخت و تنها متغیر دینامیک حالت شارژ[7] (SOC) باتری است. بنابراین سایر بخش‌های خودرو از جمله باتری با استفاده از جدول‌های ارجاع و نقشه‌های استاتیک مدل می‌شوند. این درحالی است که باتری خودروها در مقابل دمای زیاد و شرایط کاری نامناسب شدیداً آسیب‌پذیر است و مخصوصاً در خودروهای پلاگین به علت بزرگتر بودن باتری و در نتیجه بالا رفتن هزینه آن، و همچنین استفاده زیاد از باتری به دلیل قابل شارژ بودن از طریق شبکه و شارژ و تخلیه پیاپی آن، استفاده بهینه از باتری بسیار لازم و حیاتی است [۵].

[1] Powertrain
[2] Internal Combustion Engine (ICE)
[3] Hybrid Electric Vehicle (HEV)
[4] Driving cycle

5 Dynamic Programming (DP)
6 Pontryagin's Minimum Principle (PMP)
7 State of Charge (SOC)

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

مطالعات زیادی با هدف استفاده بهینه از باتری در خودروهای هیبریدی انجام شده است. از آن جمله، مراجع [۸ و ۱۰-۱۱] مدل‌سازی تغییرات دمای باتری را مورد بررسی قرار داده‌اند. دسته‌ای از مراجع در این زمینه تغییرات دمای را مدل نموده‌اند بدون آنکه آن را در مسئله مدیریت انرژی وارد کنند. دسته دیگری از مقالات نیز سلامت باتری را در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته‌اند اما دمای باتری را ثابت فرض کرده‌اند. در [۱۴-۱۲] عمر باتری و درجه سلامت[1] آن مدل‌سازی شده است. شرایط کاری نامناسب سبب کاهش عمر باتری می‌شود که به صورت افزایش مقاومت داخلی و کاهش ظرفیت نمود پیدا می‌کند. [۱۲ و ۱۴] به مدل‌سازی کاهش ظرفیت و افزایش مقاومت داخلی باتری پرداخته‌اند. در [۷] عمر باتری در مسئله مدیریت انرژی در نظر گرفته شده، اما دمای باتری ثابت فرض شده است. طراحی سیستم‌های مختلف برای مدیریت گرمایی باتری‌ها در [۱۵ و ۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. مراجع [۱۷ و ۱۸] روش‌هایی برای تخمین SOC باتری ارائه کرده‌اند ودر [۱۹] محدوده بهینه دمای باتری بررسی شده است. [۲۰] یکی از نخستین پژوهش‌ها برای در نظر گرفتن عمر باتری در مسئله بهینه‌سازی است. در این مقاله عمر باتری تنها وابسته به جریان عبوری از آن است، اما برای یک نتیجه‌گیری کلی به مدل دقیق‌تری نیاز است که در آن پارمترهای دیگر تأثیرگذار بر کارکرد باتری در نظر گرفته شود. در [۲۱] به جای در نظر گرفتن سلامت باتری در تابع هزینه، متغیر SOH به عنوان یک متغیر حالت در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه دامنه متغیرهای SOH و SOC تفاوت زیادی با یکدیگر دارد، دو کنترل‌کننده برای ردیابی نقاط مرجع به کار گرفته شد، اما بهینه بودن پاسخ تضمین نشد. با توجه به اینکه دمای باتری عامل بسیار مهم و اساسی در فرسایش باتری است، در [۲۲] جریمه‌ای برای دمای باتری در نظر گرفته شد. اما دمای باتری تنها عاملی است که در این مرجع در نظر گرفته شده و این در حالی است که عوامل دیگر حتی در دماهای متوسط هم شدیداً در کاهش عمر باتری تأثیرگذار هستند. در [۲۳] مدیریت انرژی بهینه با تابع هزینه‌ای که شامل میزان مصرف سوخت و سلامت باتری است انجام شد. این مقاله از مدلی برای فرسودگی باتری استفاده می‌کند که وابسته به دمای باتری و جریان عبوری از آن است. محدویت این مقاله در این است که باتری خودرو را بصورت استاتیک مدل نموده و دمای باتری را ثابت فرض کرده است. در [۲۴] نشان داده شده که عمر باتری خودروها در مناطق معتدل از ۷۳ تا ۹۴ درصد بیشتر از مناطق بسیار گرم می‌باشد. همچنین با مدلسازی باتری و یک سیستم خنک کننده نشان داده که وجود چنین سیستمی عمر باتری را بیش از ۱/۵ برابر افزایش خواهد داد. عوامل موثر بر باتری به دما و جریان و نحوه شارژ و دشارژ محدود نمی‌شود. از جمله [۲۵] روشی برای تخمین عمر باتری ارائه کرد و علاوه بر دما و جریان، تأثیر شیوه رانندگی را نیز بر باتری مورد بررسی قرار داد.

در مراجع بررسی شده، آثار مخرب افزایش دمای باتری بر خود باتری و همچنین بر عملکرد خودرو نشان داده شده است، اما در قالب مدیریت انرژی بیان نشده است. همچنین مراجعی که به مسئله مدیریت انرژی پرداخته اند، دمای باتری را ثابت در نظر گرفته و یا وابستگی پارامترها به دمای باتری را نادیده گرفته‌اند.

در این مقاله، ابتدا برای یک خودروی هیبرید الکتریکی که مدل آن در [۱] ارائه شده است، یک سیستم مدیریت انرژی آفلاین با استفاده از برنامه‌ریزی پویا پیاده می‌شود. در این مدل از خودروی هیبریدی، یک سیستم خنک کننده که از هوا به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده می‌کند، به کار گرفته شده است. با مدل‌سازی این سیستم خنک‌کننده، مدل باتری بهبود داده می‌شود، که این مدل شامل دینامیک الکتریکی و گرمایی باتری می‌باشد. با این کار تغییرات دمای باتری به عنوان یک متغیر دینامیک مدل می‌شود و سپس دمای باتری به عنوان متغیر حالت تحت کنترل به سیستم بهینه‌سازی مصرف سوخت افزوده می‌شود. به این ترتیب سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی دارای دو متغیر حالت خواهد بود که عبارت از SOC و دمای باتری است. نشان داده خواهد شد که در حین فرآیند مدیریت انرژی، دمای باتری و SOC تحت کنترل است و از محدوده مطلوب خارج نمی‌شود.

بنابراین نوآوری‌های این مقاله عبارت است از :

۱- بهبود مدل خودرو با مدل سازی سیستم خنک کننده باتری و در نظر گرفتن تغییرات دمای باتری برای یک خودروی هیبرید الکتریکی

۲- مدیریت انرژی آفلاین به روش برنامه‌ریزی پویا با دو متغیر حالت شامل SOC و دمای باتری در مسئله بهینه‌سازی بر اساس مدل بهبودیافته

در ادامه، ابتدا ساختار خودروهای هیبرید الکتریکی و مدل‌سازی اجزای مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی در بخش سوم شرح داده می‌شود. بخش چهارم شامل نتایج شبیه‌سازی است و در انتها بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

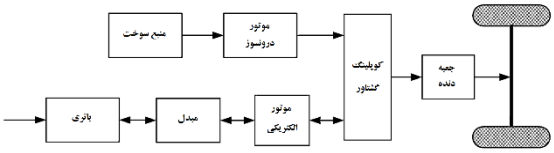
۲- خودروهای هیبرید الکتریکی

برخلاف خودروهای معمولی و الکتریکی، خودروهای هیبرید دارای حداقل دو منبع قدرت یا دو محرک برای تأمین نیروی رانشی هستند. یک خودروی هیبرید الکتریکی دارای یک موتور درونسوز یا یک پیل سوختی به عنوان مبدل سوخت یا منبع اصلی برگشت ناپذیر است. منبع کمکی یک ماشین الکتریکی به همراه یک باتری، ابرخازن[2] یا چرخ طیار[3] به عنوان منبع ذخیره انرژی است. به عنوان محرک الکتریکی انواع مختلفی از موتورهای الکتریکی وجود دارند. در بعضی ساختارها یک ماشین الکتریکی دیگر هم به عنوان ژنراتور مورد نیاز است[۱].

[1] State of Health (SOH)
[2] Ultra-capacitor
[3] Flywheel

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

این خودروها بسته به نوع ساختار به سه دسته خودروهای هیبرید الکتریکی سری، موازی و سری-موازی تقسیم می‌شوند.در این پژوهش به‌طور خاص خودروهای هیبرید الکتریکی با موتور درونسوز و باتری با ساختار موازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱: ساختارخودروی هیبرید الکتریکی موازی [۱]

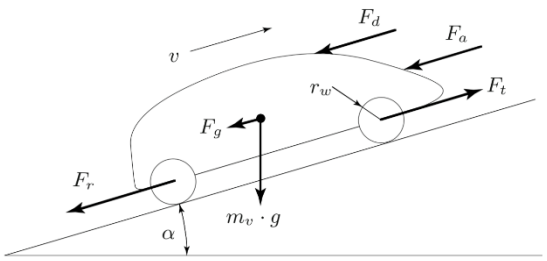
در یک خودروی هیبرید الکتریکی موازی، موتورهای درونسوز و الکتریکی هر دو به سیستم انتقال قدرت وصل شده‌اند و در نتیجه هم می‌توانند هرکدام به تنهایی خودرو را به حرکت درآورند و هم با همکاری هم. قسمت‌های اصلی خودرو، شاسی و بدنه به همراه چرخ‌ها و سیستم تولید و انتقال نیرو هستند. سیستم تولید و انتقال نیرو شامل مجموعه منابع انرژی، محرک‌ها، مدارات الکترونیکی و تجهیزات انتقال قدرت می‌باشد. بسته به حالت رانندگی، از جمله حالت شتاب‌گیری یا ترمز، یک گشتاور مثبت یا منفی از سیستم تولید و انتقال نیرو درخواست می‌شود. در یک خودروی هیبرید موازی ارتباط بین مسیر موتور درونسوز و مسیر الکتریکی، مکانیکی است. این دو مسیر در یک جمع‌کننده گشتاور ترکیب می‌شوند. توازن قدرت در این جمع‌کننده توسط کنترل‌کننده با تعیین نسبت گشتاور موتور الکتریکی به کل گشتاور درخواستی انجام می‌شود. در واقع این نسبت سهم هر کدام از منابع انرژی (موتور درونسوز و باتری) را در تأمین کل گشتاور مورد نیاز تعیین می‌کند.

۲-۱- دینامیک طولی[1] خودرو

در حوزه مدیریت انرژی، برای مدل‌سازی شاسی اتومبیل از دینامیک طولی خودرو استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱) با داشتن نیروی رانشی، سرعت خودرو را محاسبه می‌کند.

$$m_v \frac{d}{dt} v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)) \qquad (۱)$$

در این معادله m_v جرم و v سرعت خودرو، F_a اصطکاک آئرودینامیک، F_r اصطکاک غلتشی، F_g نیروی گرانش و F_d شامل بقیه اثرهای مدل‌نشده می‌باشد. نیروی رانشی F_t(مثبت یا منفی) توسط محرک اصلی خودرو تولید می‌شود. شکل ۲ نمایش رابطه (۱) است[۱].



شکل ۲: نیروهای وارده بر خودرو در دینامیک طولی [۱]

پس از تعیین سرعت و گشتاور مورد نیاز خودرو، با استفاده از مدل موتورهای الکتریکی و درونسوز و باتری، سهم این واحدها در تولید گشتاور مورد نیاز خودرو مشخص خواهد شد.

۲-۲- موتور الکتریکی

توان موتور الکتریکی (P_m) طبق رابطه (۲) تابعی از سرعت (ω_m) و گشتاور آن (T_m) است و توسط نقشه‌های بازده حالت ماندگار محاسبه می‌شود که نمونه‌ای از آنها در شکل ۳ نشان داده شده است.

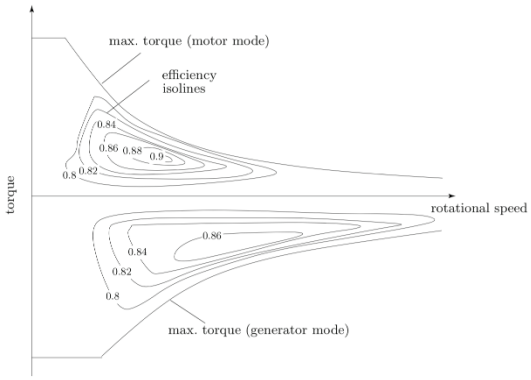
$$P_m(t) = f_m(\omega_m(t), T_m(t)) \qquad (۲)$$

مقادیر حداقل و حداکثر سرعت و گشتاور موتورهای الکتریکی با روابط (۳) و (۴) تعریف می‌شوند[۲۶].

$$0 \le \omega_m(t) \le \omega_{m,\max} \qquad (۳)$$

$$T_{m,\min}(\omega_m(t)) \le T_m(t) \le T_{m,\max}(\omega_m(t)) \qquad (۴)$$

در این روابط ω_m سرعت، $\omega_{m,\max}$ حداکثر سرعت، $T_{m,\min}$ حداقل گشتاور و $T_{m,\max}$ حداکثر گشتاور موتور الکتریکی است.



شکل ۳: نقشه بازده برای یک موتورالکتریکی [۱]

[1] Longitudinal dynamic

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

۲-۳- مدل موتور درونسوز

مانند آنچه در مورد موتورهای الکتریکی بیان شد، توان موتور درونسوز (P_e) نیز با استفاده از نقشه‌های آفلاین به دست می‌آید. سرعت مصرف سوخت $(\dot{m}_{fuel})$ با استفاده از رابطه (۵)محاسبه می‌شود که در آن H_l ارزش حرارتی پایین (LHV) سوخت مصرفی است.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P_e}{H_l} \qquad (۵)$$

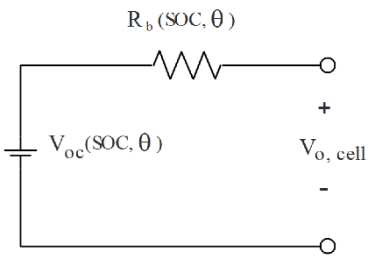
برای سرعت و گشتاور موتور درونسوز نیز محدودیت‌هایی طبق روابط (۶) و (۷) وجود دارد.

$$\omega_{e,\min} \le \omega_e(t) \le \omega_{e,\max} \qquad (۶)$$

$$0 \le T_e(t) \le T_{e,\max}(\omega_e(t)) \qquad (۷)$$

۲-۴-مدل باتری

باتری خودروهای هیبرید الکتریکی مورد بررسی از اتصال سری تعدادی سلول یکسان تشکیل می‌شود. بنابراین معمولاً یک سلول تنها مدل شده و ولتاژ خروجی باتری مجموع ولتاژ سلول‌ها خواهد بود.در بحث مدیریت انرژی معمولاً از مدار معادل الکتریکی شکل ۴ برای مدل‌سازی باتری استفاده می‌شود. این مدار معادل شامل مقاومت داخلی باتری (R_b) و یک منبع ولتاژ ایده‌آل به نام V_{OC} به عنوان ولتاژ مدار-باز باتری می‌باشد. این ولتاژ، ولتاژ دو سر باتری است وقتی جریانی از آن نگذرد. البته برای سادگی بیشتر، دمای باتری θ ثابت فرض می‌شود و مقاومت داخلی و ولتاژ مدار-باز تنها وابسته به SOC خواهند بود.



شکل ۴: مدار معادل باتری

حالت شارژ یا SOCباتری طبق رابطه (۸) نسبت میزان شارژ فعلی باتری به ظرفیت کل آن است.

$$SOC(t) = \frac{S(t)}{S_0} \qquad (۸)$$

همانطور که در مقدمه ذکر شد، به منظور کنترل دمای باتری و در نتیجه افزایش طول عمر آن و بهبود عملکرد خودرو لازم است که تغییرات دمای باتری در سیستم مدیریت انرژی در نظر گرفته شود. بدین منظور از مدل پیشنهادی در [۱۲و ۱۴] برای باتری استفاده می‌شود. مدل ارائه شده برای باتری از دو بخش الکتریکی و گرمایی تشکیل می‌شود. مدل الکتریکی برای محاسبه ولتاژ باتری و SOC به کار می‌رود و از مدل گرمایی برای پیش بینی دمای باتری استفاده می‌شود. زیر-سیستم الکتریکی مدل باتری در شکل ۴ نشان داده شده است.برای این مدل، تغییرات SOC به صورت زیر قابل محاسبه است.

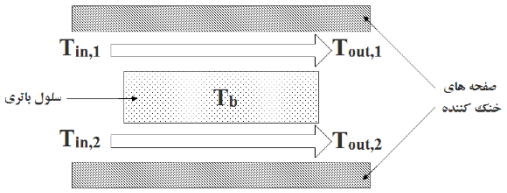
$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\frac{I_b(t)}{S_0} \qquad (۹)$$

$$V_O(t) = V_{OC} - R_b(t).I_b(t) \qquad (۱۰)$$

در روابط فوق $S(t)$ میزان شارژ فعلی باتری، S_0 ظرفیت کل آن و I_bجریان باتری است که با رابطه (۱۱)به دست می‌آید.

$$I_b = \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4R_bP_m}}{2R_b} \qquad (۱۱)$$

برای بررسی مدل گرمایی باتری، سیستم خنک کننده آن در شکل ۵ نشان داده شده است. این سیستم از هوا به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده می‌کند. این سیستم از سیستمی که از مایع استفاده می‌کند، پیچیدگی کمتری دارد. برای خودروهای هیبریدی موازی چنین سیستمی عملکرد مناسبی دارد، اما برای خودروهای سری سیستم خنک کننده با مایع ترجیح داده می‌شود[۲۷].



شکل ۵: سیستم خنک کننده با دو کانال

در شکل ۵، $\theta_{in,i}$ دمای هوایی است که به کانال وارد می‌شود. با عبور هوا از کانال‌ها، باتری خنک می‌شود و دمای هوا در خروجی کانال‌ها به $\theta_{out,i}$ می‌رسد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

در مدل گرمایی باتری، بر اساس قانون پایستگی انرژی تغییرات دمای سلول باتری از رابطه (۱۲) پیروی می‌کند که در آن θ دمای باتری، Q_g سرعت تولید گرما و Q_d سرعت دفع گرما توسط کانال‌های سیستم خنک‌کننده، و m_C و $C_{P,C}$ به ترتیب وزن و ظرفیت گرمایی ویژه سلول باتری هستند.

$$m_C C_{P,C} \frac{d\theta}{dt} = Q_g - Q_d \qquad (۱۲)$$

در [۲۸] سرعت تولید گرما با رابطه (۱۳) نشان داده شده است. در این رابطه $\frac{\partial V_{OC}}{\partial \theta}$ در مقایسه با جمله‌های دیگر قابل چشم پوشی می‌باشد[۱۱].

$$Q_g = I_b.(\mathrm{V_{OC}} - \mathrm{V_O} - \frac{\partial V_{OC}}{\partial \theta}.\theta) \qquad (۱۳)$$

گرمای دفع شده توسط سیستم خنک‌کننده، طبق رابطه (۱۴) شامل گرمای دفع شده از کانال‌های ۱ و ۲ است.

$$Q_d = Q_{ku,1} + Q_{ku,2} \qquad (۱۴)$$

با ورود هوا به کانال‌ها با دمایی کمتر از دمای باتری، گرمای باتری از طریق تبادل گرمایی سطحی[1] از طریق کانال‌ها دفع می‌شود.سرعت دفع گرما از هر کانال با رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. طبق این رابطه، سرعت تبادل گرما در خروجی کانال‌ها تابعی از دما در خروجی کانال و دمای سلول باتری است

$$Q_{ku,i} = \bar{h}_i A_{ch} (\theta - \theta_{out,i}) \qquad (۱۵)$$

A_{ch} سطح انتقال حرارت کانال، $\bar{h}_i$ میانگین ضریب انتقال حرارت در طول کانال و $\theta_{out,i}$ دمای هوا در خروجی کانال i است. بر اساس معادله موازنه انرژی، سرعت مبادله گرما در ورودی کانال‌ها ، با سرعت مبادله گرما در خروجی کانال‌ها برابر است[۱۲]. بنابراین رابطه (۱۶) را می‌توان نوشت.

$$Q_{ku,i} - Q_{u,i} = 0 \qquad (۱۶)$$

سرعت مبادله گرما در ورودی کانال‌ها که تابعی از دمای هوای ورودی و خروجی کانال است، با رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$Q_{u,i} = \rho_{air} c_{p,air} q_{air,i} (\theta_{out,i} - \theta_{in,i}) \qquad (۱۷)$$

در این رابطه ρ_{air} چگالی هوا، $C_{p,air}$ ظرفیت گرمایی ویژه و $q_{air,i}$ سرعت جریان حجمی هوا در کانال‌ها است.

با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۷) و حذف $\theta_{out,i}$ از این روابط، روابط (۱۸) تا (۲۰) برای محاسبه سرعت دفع گرما (Q_d) به دست می‌آید.

$$Q_d = \alpha_1 \theta + \alpha_2 \theta_{in,1} + \alpha_3 \theta_{in,2} \qquad (۱۸)$$

ضرایب α_1 ، α_2، α_3 و مقاومت های گرمایی $R_{ku,i}$ و $R_{u,i}$ با رابطه (۱۹) تعریف می‌شوند

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \frac{1}{R_{ku,1} + R_{u,1}} + \frac{1}{R_{ku,2} + R_{u,2}} \\
\alpha_2 &= -\frac{1}{R_{ku,1} + R_{u,1}} \\
\alpha_3 &= -\frac{1}{R_{ku,2} + R_{u,2}} \\
R_{ku,i} &= \frac{1}{\bar{h}_i . A_{ch}} \\
R_{u,i} &= \frac{1}{\rho_{air} c_{p,ir} . q_{air,i}}
\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

در نتیجه با توجه به روابط (۱۲) تا (۱۹) معادله حالت برای دمای باتری مطابق رابطه(۲۰) خواهد بود.

$$\dot{\theta} = \frac{R_b . I_b^2}{m_C c_{P,C}} - \frac{\alpha_1 \theta + \alpha_2 \theta_{in,1} + \alpha_3 \theta_{in,2}}{m_C c_{P,C}} \qquad (۲۰)$$

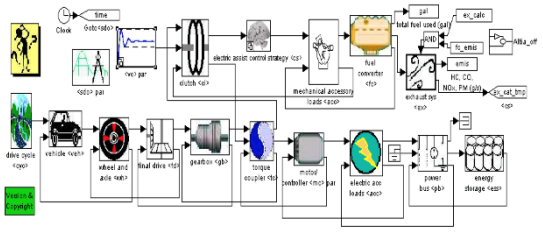
به کمک مدل‌سازی انجام شده برای باتری، می‌توان مدیریت انرژی بر اساس SOC و تغییرات دمایی در خودرو انجام داد و به این ترتیب همواره از میزان سلامت باتری اطمینان حاصل کرد.

۲-۵- راستی‌آزمایی مدل باتری

در این بخش به منظور راستی‌آزمایی مدل گرمایی باتری از نرم‌افزار ADVISOR[2] استفاده می‌شود. این نرم‌افزار که در محیط MATLAB نوشته شده، محصول NREL[3] برای طراحی، بهینه‌سازی و آنالیز خودروهای هیبریدی می‌باشد. ADVISOR با داشتن محیط گرافیکی و پایگاه داده وسیعی از اجزای مختلف خودروها و همچنین ابزارهای کاملی برای رسم و آنالیز نمودار متغیرهای مختلف جامع‌ترین و کاربردی‌ترین نرم افزار در این زمینه می‌باشد [۲۹ و ۳۰] .

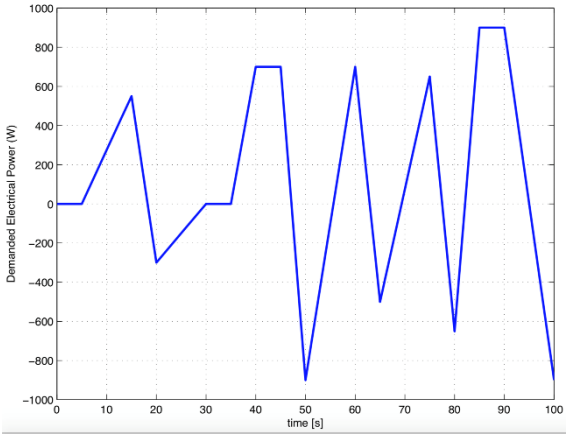
[1] Surface convection
[2] Advanced Vehicle Simulator
[3] National Renewable Energy Laboratory

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]



شکل ۶: مدل یک خودروی هیبرید الکتریکی موازی در ADVISOR

برای مقایسه تغییرات دما در مدل سیمولینک ADVISOR با مدل دینامیک در این مقاله، سیگنال شکل ۷ تولید و به هر دو مدل اعمال شد. این سیگنال به عنوان توان الکتریکی درخواستی از باتری، ورودی مدل می‌باشد.

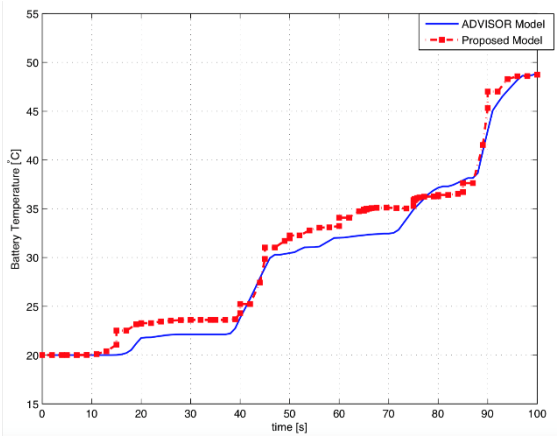


شکل ۷: سیگنال توان الکتریکی درخواستی برای راستی آزمایی مدل

در شکل ۸ تغییرات دمای مدل دینامیکی این مقاله با نرم‌افزار ADVISOR مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مدل مورد استفاده در این مقاله به خوبی مدل ADVISOR را دنبال می‌کند.

۲-۶-سیکل رانندگی

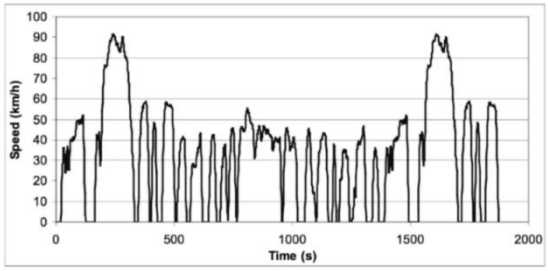
یک سیکل رانندگی، شامل داده‌هایی مانند سرعت و شتاب مطلوب، و شیب و ارتفاع جاده‌ای که خودرو باید طی کندبرحسب زمان است. سیکل‌های استانداردی به منظور ایجاد شرایط مقایسه میزان مصرف سوخت وآلایندگی خودروها و یا استراتژی‌های مختلف کنترلی وجود دارند. نمونه‌ای از نمودار سرعت-زمان سیکل استاندارد FTP_75 در شکل ۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۸: راستی آزمایی مدل گرمایی باتری

۳- روش مدیریت انرژی پیشنهادی

مدیریت انرژی بهینه عبارت است از یافتن قانون کنترل برای حداقل‌سازی تابع هزینه در طول سیکل رانندگی برای برآورده شدن نیازهای رانندگی با در نظر گرفتن قیدهای مختلفی که بر روی متغیرهای



شکل ۹: نمودار سرعت-زمان سیکل رانندگی FTP-75 (استرالیا)

حالت و کنترل تعریف می‌شوند. بیان‌های متفاوتی از مسئله کنترل بهینه برحسب قیدها و شاخص‌های عملکرد مختلف وجود دارد [۱]. تابع هزینه در روش‌های مدیریت انرژی شامل معیارهای مختلفی مانند سوخت مصرفی، انتشارات آلاینده، قابلیت رانندگی[1]، شیب‌پیمایی[2] و یا ترکیبی از آنها با تعریف ضرایب وزنی برای برقراری تعادل بین آنها می‌باشد [۳۲]. در روش پیشنهادی تابع هزینه طبق رابطه (۲۱) انتخاب شده است. در این تابع هزینه، $\dot{m}_{fuel}$ سرعت مصرف سوخت می‌باشد که با رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$J = \int_0^{T_f} \dot{m}_f(\omega(t), u(t))dt \qquad (۲۱)$$

متغیر کنترلی u در این سیستم نسبت تقسیم گشتاور است. با داشتن گشتاور کل مورد نیاز در چرخ‌های خودرو، T_w، و نسبت u که توسط

[1] Drivability
[2] Gradability

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

کنترل‌کننده نظارتی تعیین می‌شود، طبق روابط (۲۲) و (۲۳) گشتاور درخواستی در موتور درونسوز و موتور الکتریکی، به ترتیب T_e و T_m قابل محاسبه می‌باشند.

$$T_m(t)+T_e(t)=T_w(t) \qquad (۲۲)$$

$$u(t)=T_m(t)/T_w(t) \qquad (۲۳)$$

با توجه به مطالب فوق و روابط (۱) تا (۲۳)، مدل نهایی خودرو ترکیبی از معادلات دینامیک و نقشه‌ها و جداول ارجاع می‌باشد که در (۲۴) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
&m_v \frac{d}{dt}v(t)=F_t(t)-(F_r(t)+F_g(t)+F_d(t)+F_i(t))\\
&T_w(t)=F_t(t).\omega_r\\
&T_m(t)=u(t).T_w(t)\\
&T_e(t)=T_w(t)-T_m(t)\\
&P_m(t)=f_m(\omega_m(t),T_m(t))\\
&P_e(t)=f_e(\omega_e(t),T_e(t))\\
&I_b=\frac{V_{OC}-\sqrt{V_{OC}^2-4R_bP_m}}{2R_b}\\
&\frac{dSOC(t)}{dt}=-\frac{I_b(t)}{S_0}\\
&\dot{\theta}=\frac{R_b.I_b^2}{m_C.c_{P,C}}-\frac{\alpha_1\theta+\alpha_2\theta_{in,1}+\alpha_3\theta_{in,2}}{m_C.c_{P,C}}
\end{aligned} \qquad (۲۴)$$

روند محاسبات در این مدل به این صورت است که ابتدا نیروی رانشی F_t و گشتاور مورد نیاز خودرو T_w برای رسیدن به سرعت سیکل رانندگی v به‌دست می‌آید. سپس با توجه به نسبت u تعیین شده توسط ورودی کنترلی، گشتاور موتور الکتریکی و موتور درونسوز محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با داشتن سرعت و گشتاور موتورها، توان آنها به کمک نقشه های بازده این موتورها به‌دست می‌آید. رابطه بعد مربوط به جریان باتری است و در نهایت تغییرات حالت شارژ و دمای باتری به عنوان متغیرهای حالت با دو رابطه آخر این مدل محاسبه می‌شوند.

در روش استاندارد مدیریت انرژی که در اغلب مراجع پیشین استفاده شده، تنها متغیر حالت دینامیک سیستم، SOC باتری است و برای بقیه اجزای خودرو از مدل استاتیک استفاده می‌شود [۱].

استفاده از جداول ارجاع برای مدل باتری و در نظر نگرفتن دینامیک گرمایی و تغییرات دمای باتری سبب آسیب به باتری و کاهش عمر آن خواهد شد و از آنجا که باتری یک خودروی هیبریدی حساس‌ترین و پرهزینه‌ترین جزء آن است و عملکرد آن تأثیر زیادی بر عملکرد کلی خودرو دارد، لازم است به منظور عملکرد بهینه باتری SOC و دمای آن در محدوده مشخصی حفظ شوند. در این مقاله، جهت کنترل دمای باتری علاوه بر میزان شارژ آن حین مدیریت انرژی، با در نظر گرفتن دینامیک الکتریکی-گرمایی باتری، مسئله مدیریت انرژی با دو متغیر حالت SOC و θ با روابط (۲۵) تعریف می‌شود.

در این تعریف برای هر کدام از متغیرهای حالت کران بالا و پایینی در بازه زمانی $[0,t_f]$ در نظر گرفته شده و همچنین مقدار نهایی آنها در یک بازه مقید شده است. SOC_{low} و SOC_{high} حدود بالا و پایین، و SOC_0 مقدار اولیه SOC است. $SOC(t_f)$ مقدار نهایی SOC است و بازه مجاز برای آن توسط $SOC_{N,\min}$ و $SOC_{N,\max}$ تعریف می‌شود. پارامترهای مربوط به دمای باتری نیز به همین صورت تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned}
&x(t)=[\mathrm{SOC(t)}\quad \theta(t)]^T\\
&\dot{x}(t)=\begin{bmatrix} -\frac{I_b}{S_0} \\ \frac{R_b.I_b^2}{m_C.c_{P,C}}-\frac{\alpha_1\theta+\alpha_2\theta_{in,1}+\alpha_3\theta_{in,2}}{m_C.c_{P,C}} \end{bmatrix}\\
&SOC_{low}\le SOC(t)\le SOC_{high}\\
&SOC(T_f)\in[SOC_{N,\min},SOC_{N,\max}]\\
&\theta_{low}\le\theta(t)\le\theta_{high}\\
&\theta(T_f)\in[\theta_{N,\min},\theta_{N,\max}]\\
&J=\int_0^{T_f}\dot{m}_{fuel}(\omega(t),u(t))dt
\end{aligned} \qquad (۲۵)$$

برای یافتن پاسخ بهینه مسئله مدیریت انرژی خودروهای هیبرید از روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود. از میان همه روش‌های اجرا شده، برنامه‌ریزی پویا بیشترین کاربرد و بهترین عملکرد را داشته است، به این دلیل که بر اساس اصل بهینگی بلمن [۳۳ و ۳۴] پاسخ بهینه کلی را تضمین می‌کند و همانطور که در ادامه نشان داده خواهد شد مسئله مدیریت انرژی بهینه (۲۵) کاملاً سازگار با فرم مسئله در برنامه‌ریزی پویا (۲۶) است.

برنامه‌ریزی پویا روش بسیار مناسبی برای یافتن توالی کنترل بهینه و مسیر بهینه متغیرهای حالت در مسائلی به فرم (۲۶) است که در آن $k=0,1,...,N$. در رابطه (۲۶)، $g_N(x_N)$ جریمه‌ای برای مقید کردن مقدار نهایی متغیر حالت و $g_k(x^k,u_k)$ نشان دهنده تابع هزینه انتقال[1] است. مقدار این تابع، هزینه اعمال u_k در لحظه k به سیستمی با تابع حالت $f_k(x^k,u_k)$ و مقدار اولیه x_0 است.

[1] Cost-to-go function

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

$$\begin{cases} \min\limits_{u_k \in U_k} \left\{ g_N\left(x_N\right) + \sum\limits_{0}^{N-1} g_N\left(x_k, u_k\right) \right\} \\ x_{k+1} = f_k\left(x_k, u_k\right) \\ x_0 = x0 \\ x_N \in T \subset R^n \\ x_k \in X_k \subset R^n \\ u_k \in U_k \subset R^m \end{cases} \qquad (۲۶)$$

با توجه به این که برنامه‌ریزی پویا یک روش عددی است، مسئله کنترل پیوسته باید به فرم (۲۶) گسسته شود. دقت روش به دقت شبکه‌بندی یا رزولوشن فضاهای زمان و حالت بستگی دارد. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از فضاهای گسسته شده زمان و متغیر حالت برای مسئله‌ای با یک متغیر حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۰: گسسته‌سازی فضای حالت و زمان [۳۵]

برای هر یک از نقاط روی شبکه مقدار تابع هزینه انتقال تعیین می‌شود و برای نقاط میانی نیز به روش مناسبی برای درونیابی نیاز است.

مسئله مهم دیگر، مقدار تابع هزینه برای حالت‌های غیرممکن است. تخصیص هزینه انتقال بی‌نهایت نخستین روشی است که برای چنین نقاطی پیشنهاد شد. همانطور که گفته شد برای تعیین تابع هزینه انتقال نقاط میانی شبکه بندی فضا از درونیابی استفاده می‌شود. آنگاه انجام درونیابی برای نقاط مجاور حالت‌های غیر ممکن باعث می‌شود، آن نقاط هم به نقاط غیرممکن تعبیر شوند و این مهمترین مشکل تخصیص مقدار بی‌نهایت است. روش‌هایی برای حل این مشکل پیشنهاد شد از جمله آن می‌توان به تخصیص مقدار بسیار بزرگ به جای مقدار بی‌نهایت اشاره کرد [۳۶].

الگوریتم برنامه‌ریزی پویا به صورت زیر تابع هزینه بهینه $J_k\left(x^i\right)$ را با شروع از انتهای مسیر $\left(k = N\right)$ و با انجام محاسبات بازگشتی تا $k = 0$ و برای تمامی نقاط فضای گسسته شده زمان-حالت محاسبه می‌کند :

۱) تعیین مقدار اولیه تابع هزینه در $k = N$.

$$J_N\left(x^i\right) = \begin{cases} g_N\left(x^i\right) & x^i \in T \\ \infty & else \end{cases} \qquad (۲۷)$$

در لحظه آخر تابع هزینه انتقال صفر است چون حالت بعدی وجود ندارد. در مسائلی که مقدار نهایی متغیر حالت مقید است، $J_N\left(x^i\right)$ برابر با جریمه انحراف مقدار نهایی $g_N\left(x^i\right)$ است. با توجه به (۲۵) مقدار نهایی متغیرهای حالت شارژ و دمای باتری در مسئله مدیریت انرژی مقید است. این قید در (۲۶) با مجموعه T تعیین می‌شود. در این مرحله به ازای مقادیر نهایی SOC و θ خارج از حدود تعیین شده در مسئله مقدار ∞ اختصاص داده می‌شود. بنابراین مسیرهای منتهی به این مقادیر، مسیربهینه و پاسخ مسئله نخواهند بود.

۲) محاسبه تابع هزینه بهینه $J_k\left(x^i\right)$ در تمام نقاط فضای گسسته برای $k = N-1$ تا $k = 0$ و به ازای $x^i \in X_k$.

$$J_k\left(x^i\right) = \min_{u_k \in U_k} \left\{ g_k\left(x^i, u_k\right) + J_{k+1}\left(f_k\left(x^i, u_k\right)\right) \right\} \qquad (۲۸)$$

در مراحل میانی برای هر نقطه از فضای حالت یک مسیر بهینه تا انتهای مسیر یافته و برای استفاده در مراحل بعد ذخیره می‌شود. در واقع هر زیر-مسئله یک بار حل شده و جواب آن ذخیره می‌شود و با این کار از تکرار اجرای زیر-مسئله‌ها زمانی که مجدداً به پاسخ آنها نیاز است جلوگیری می‌شود. تابع هزینه انتقال $J_k\left(x^i\right)$ هزینه حرکت از نقطه x^i در لحظه k تا انتهای مسیر بهینه است که از دو جمله $g_k\left(x^i, u_k\right)$ و $J_{k+1}\left(f_k\left(x^i, u_k\right)\right)$ شکیل می‌شود. جمله اول هزینه انتقال از نقطه x^i در لحظه k تا نقطه $f_k\left(x^i, u_k\right)$ در لحظه $k+1$ و جمله دوم هزینه مسیر بهینه از این نقطه جدید تا انتهای مسیر است که در مرحله قبل محاسبه و ذخیره شده است و نیازی به محاسبه آن در این مرحله نیست. به این ترتیب با ادامه این الگوریتم تا $k = 0$ سیگنال کنترل بهینه در هر لحظه به دست آمده و در نهایت توالی کنترل بهینه $\pi = \{\mu_0 \quad \mu_1 \quad \dots \quad \mu_{N-1}\}$ حاصل می‌شود.

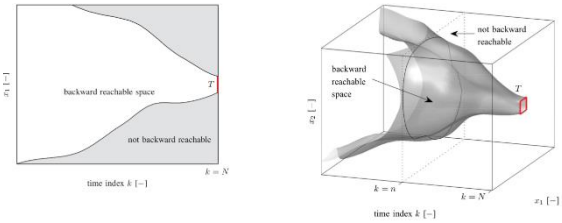
بار محاسباتی روش برنامه‌ریزی پویا به‌طور نمایی با افزایش تعداد متغیرهای حالت سیستم، و به‌طور خطی با افزایش زمان نهایی افزایش می‌یابد، بنابراین مدیریت انرژی بهینه با این روش در سیکل‌های طولانی فقط وقتی میسر است که تعداد متغیرهای حالت بسیار کم باشد [۳۲] . مشکل دیگری که با اضافه کردن یک متغیر حالت (دمای باتری) به مسئله به وجود می‌آید، پیچیدگی محاسبه فضای قابل دسترسی رو به عقب[1]است. این فضا در مسائلی مطرح می‌شود که در آنها مقدار نهایی متغیر حالت مقید است. در چنین مسائلی فضای قابل دسترسی رو به عقب مجموعه مسیرهایی است که به مقدار نهایی مطلوب متغیر حالت منتهی می‌شود. محاسبه این فضا بار محاسباتی روش را شدیداً کاهش می‌دهد. در مسائلی با بیش از یک متغیر حالت این فضا چندبعدی خواهد شد و

[1] Backward-reachable space

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

محاسبه آن پیچیده‌تر و در عین حال با توجه به افزایش نمایی بار محاسبات، ضروری تر خواهد بود. فضای قابل دسترسی رو به عقب در مسئله‌ای دارای یک متغیر حالت و مسئله‌ای دارای دو متغیر حالت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

برای حل این مشکل در روش پیشنهادی از روشی که در [۳۷] ارائه شده استفاده شده است. در [۳۷] اجرای برنامه‌ریزی پویا برای مسائل چندبعدی مورد بررسی قرار گرفته و در روش پیشنهادی آن از توابع Level-Set برای محاسبه فضای قابل دسترسی رو به عقب استفاده شده است.



شکل ۱۱: فضای قابل دسترسی رو به عقب در مسائل دارای یک متغیر حالت(سمت چپ) و دو متغیر حالت (سمت راست) [۳۷]

برخی مراجع به منظور کاهش بار محاسباتی مدیریت انرژی با برنامه‌ریزی پویا ساده‌سازی‌هایی مانند خطی‌سازی تابع هزینه نسبت به متغیر کنترلی انجام شده که منجر به نتایج زیر-بهینه خواهد شد، اما روش پیشنهادی این مقاله باعث زیر-بهینه شدن پاسخ نمی‌شود. زیرا به جای ساده کردن مسئله، سرعت جستجو و اجرای روش بهینه‌سازی را افزایش می‌دهد. در واقع نوآوری این مقاله بهبود مدل باتری خودرو با مدل‌سازی تغییرات دمای باتری و حل مشکلات ناشی از افزایش یک متغیر حالت در مسئله بهینه‌سازی است.

٤- نتایج شبیه‌سازی

خودروی مورد بررسی خودروی هیبرید الکتریکی موازی DaimlerChrysler Hyper از سری A-Class Mercedes است که مدل آن در [۱] ارائه شده است. مقادیر پارامترهای عمومی خودرو در جدول ۱، و مشخصات باتری خودرو به طور جداگانه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدل خودرو [۱]

پارامتر	مقدار	واحد
جرم خودرو	۱۸۰۰	kg
شعاع چرخ	۰/۳	m
اصطکاک غلتشی	۱۴۴	N
ضریب آئرودینامیک	۰/۴۸	$n.s^2.m^{-2}$
حداکثر گشتاور موتور درونسوز	۱۹۹	N.m
حداکثر گشتاور موتور الکتریکی	۱۳۳	N.m
حداکثر سرعت موتور درونسوز	۵۰۳	$rad.s^{-1}$
حداکثر سرعت موتور الکتریکی	۶۰۰	$rad.s^{-1}$

جدول ۲: مقادیر پارامترهای مدل باتری Li-ion [۱۴]

پارامتر	مقدار	واحد
طول	۰/۱۹	m
عرض	۰/۱۴۵	m
ضخامت	۰/۰۰۵	m
وزن	۳/۸۴	kg
ظرفیت نامی	۱۵	A.h
ولتاژ نامی	۳/۷۵	v
ظرفیت گرمایی ویژه	۸۰۰	$J.kg^{-1}.K^{-1}$

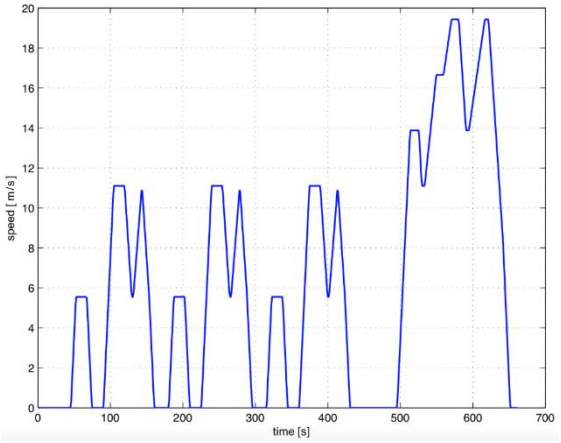
سیکل رانندگی مورد استفاده در شبیه سازی، سیکل استاندارد JN-1015 با مشخصات ذکر شده در جدول ۳ است.

جدول ۳: مشخصات سیکل JN-1015 ژاپن[۳۱]

پارامتر	مقدار	واحد
مسافت	۴۱۶۵/۲۷	m
زمان	۶۶۰	s
بیشترین سرعت	۱۹/۴۴	$m.s^{-1}$
میانگین سرعت حرکت	۸/۵	$m.s^{-1}$
میانگین شتاب مسیر	۰	$m.s^{-2}$
میانگین شتاب مثبت	۰/۳۷	$m.s^{-2}$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

نمودار سرعت-زمان سیکل JN-1015 در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: سیکل رانندگی JN-1015

ابتدا با چشم پوشی از اثر دینامیک گرمایی باتری، تغییرات دما در روابط مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود. تنها متغیر حالت سیستم SOC است و مقادیر پارامترهای مربوط به آن در جدول ۴ داده شده است.

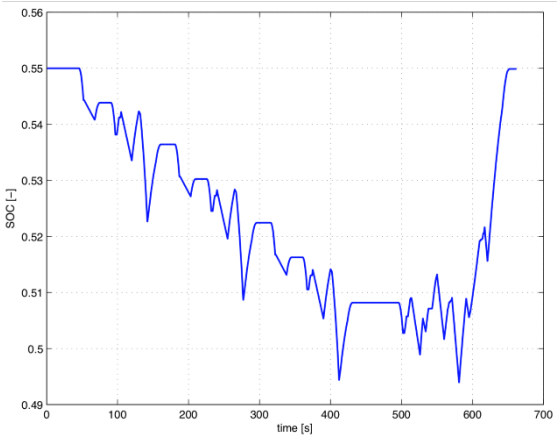
جدول ۴: مقادیر پارامترهای مربوط به SOC در مدیریت انرژی

پارامتر	مقدار	واحد
SOC_{low}	۰/۴	-
SOC_{high}	۰/۷	-
SOC_0	۰/۵	-
$SOC_{N,min}$	۰/۵۴	-
$SOC_{N,max}$	۰/۵۵	-

برای مقایسه مصرف سوخت در روش‌های مختلف از معیار مصرف سوخت با واحد $liter/100km$ استفاده می‌شود. مقدار مصرف سوخت به لیتر با رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود که در آن $\dot{m}_{fuel}$ سرعت مصرف سوخت با رابطه (۵) و $\rho_B = 810kg/m^3$ چگالی سوخت مورد استفاده است.

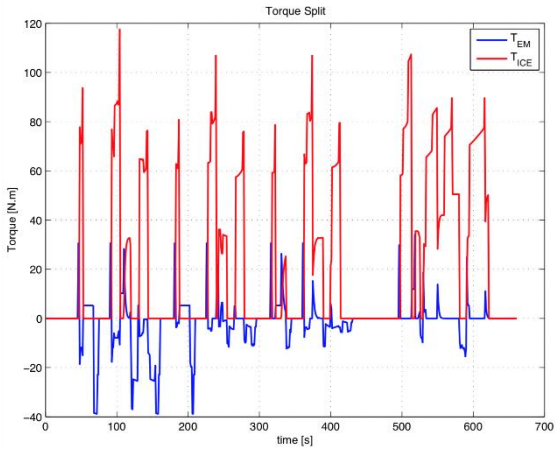
$$Fc = \frac{1000}{\rho_B . \dot{m}_{fuel}} \qquad (۲۹)$$

مصرف سوخت در این روش برابر ۴/۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد. شکل ۱۳ تغییرات SOC را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد، در خودروهای هیبرید الکتریکی غیر قابل شارژ توسط شبکه میزان سطح شارژ نهایی باید نزدیک به مقدار اولیه آن باشد. در شکل ۱۰مشاهده می‌شود که SOC در پایان مسیر به مقدار اولیه نزدیک می‌شود.



شکل ۱۳: نمودار SOC برای مدیریت انرژی بدون کنترل دمای باتری

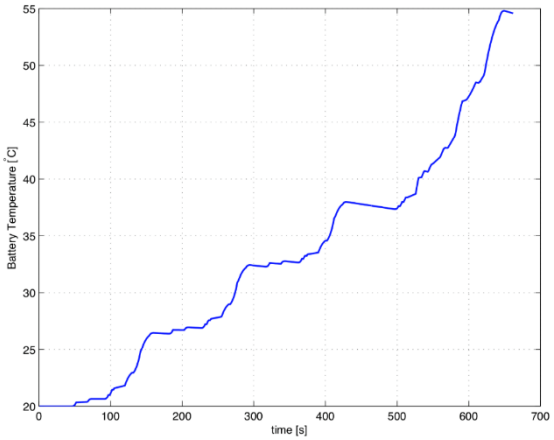
در شکل ۱۴ نحوه تقسیم گشتاور درخواستی بین موتورهای الکتریکی و درونسوز توسط متغیر کنترلی $u(t) = T_m(t)/T_w(t)$ نشان داده شده است. به دلیل این که قدرت موتور الکتریکی کمتر از موتور درونسوز است گشتاورهای بالا به ناچار توسط موتور درونسوز تأمین می‌شود. برای مقادیری از گشتاور که توسط هر دو موتور قابل تأمین است، اولویت با موتور الکتریکی است، به این شرط که سطح شارژ باتری از حداقل شارژ مجاز کمتر نشود. گشتاورهای منفی نیز توسط موتور الکتریکی (در حالت ژنراتوری) برای شارژ باتری استفاده می‌شود.



شکل ۱۴: تقسیم گشتاور بین موتورهای الکتریکی ودرونسوز

همانطور که اشاره شد، در مسئله بهینه سازی اجرا شده در این بخش، دمای باتری ثابت در نظر گرفته شد. حال با استفاده از پارامترهای مدل باتری و بردارهای مقاومت داخلی و جریان باتری حاصل، اثر استراتژی مدیریت انرژی انجام شده را بر دمای باتری نشان می‌دهیم.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]



شکل ۱۵ : اثر نادیده گرفتن تغییرات دمای باتری در مدیریت انرژی

در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که دمای باتری به دلیل نادیده گرفته شدن در بهینه‌سازی با وجود سیستم خنک کننده، تا حدود ۵۵ درجه سانتی گراد افزایش پیدا کرده است.

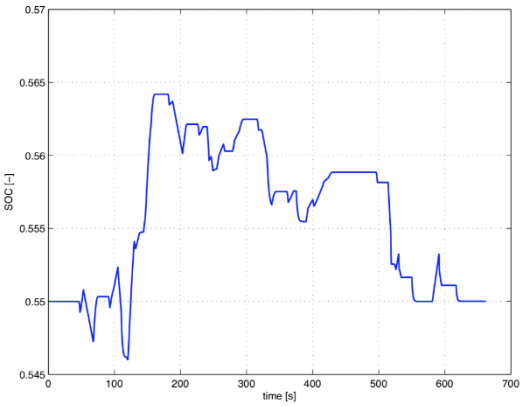
در ادامه نتایج روش پیشنهادی نشان داده می‌شود. در این روش از مدل بهبودیافته باتری که در بخش ۲-۴ شرح داده شد در مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. دمای باتری بعنوان متغیر حالت دوم در کنار SOC در برنامه‌ریزی پویا لحاظ می‌شود.

مقادیر پارامترهای مربوط به SOC به همان صورت جدول ۴ است و برای دمای باتری به صورت جدول ۵ مقداردهی می‌شوند.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای مربوط به θ در مدیریت انرژی

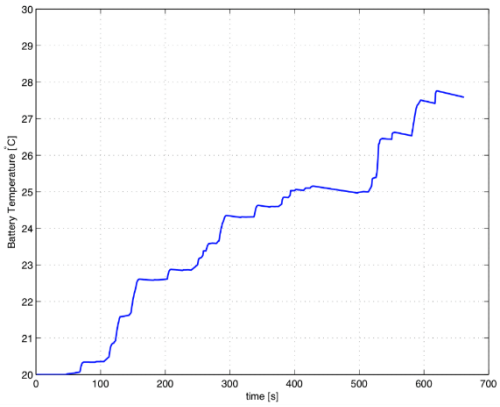
پارامتر	مقدار	واحد
θ_{low}	۱۰	K
θ_{high}	۳۰	K
θ_0	۲۰	K
$\theta_{N,min}$	۱۵	K
$\theta_{N,max}$	۲۵	K

افزودن قیدهای حد بالا و پایین دمای باتری به مسئله بهینه سازی موجب استفاده کمتر از باتری شده است. در این حالت اگر تأمین گشتاور درخواستی موجب افزایش دما و نزدیک شدن به حد مجاز بالای دما شود از آن جلوگیری می‌شود. این امر، موجب افزایش کارکرد موتور درونسوز و در نتیجه افزایش مصرف سوخت خواهد شد. مصرف سوخت در این حالت به میزان ۵/۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر رسیده است. شکل‌های ۱۶ و۱۷ تغییرات SOC و دمای باتری را در روش پیشنهادی نشان می‌دهند.



شکل ۱۶: نمودار SOC در روش پیشنهادی

ملاحظه می‌شود که علاوه بر SOC، دمای باتری نیز در محدوده تعیین شده باقی مانده و مقدار نهایی آن به ۲۷ درجه سانتی‌گراد رسیده است.



شکل ۱۷: کنترل تغییرات دمای باتری در روش پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای مدیریت انرژی آفلاین خودروهای هیبرید الکتریکی با تکیه بر استفاده بهینه از باتری برای اولین بار در خودروی هیبرید الکتریکی پیشنهاد گردید. مسئله مدیریت انرژی بهینه این خودروها مسئله‌ای غیرخطی و دارای قیود عملکرد مختلف با توجه به مدل‌سازیو متغیرهای سیستم است. برای یافتن پاسخ بهینه کلی چنین مسئله‌ای به صورت آفلاین، برنامه‌ریزی پویا که روش حل عددی آن مبتنی بر حل زیر-مسئله‌ها و ترکیب پاسخ‌ها است، روش بسیار مناسبی است. این روش با فرض ثابت بودن دمای باتری بر روی خودروی مورد بررسی اعمال شد و با مدل‌سازی تغییرات دمای باتری نشان داده شد که فرض ثابت ماندن دمای باتری غیرعملی است و اثر مدیریت انرژی بر دمای باتری قابل چشم‌پوشی نیست. خروج دمای باتری از محدوده بهینه و افزایش بی‌رویه

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

آن به مرور باعث افزایش مقاومت داخلی باتری، کاهش ظرفیت آن و در نتیجه سبب تسریع فرسودگی باتری می‌شود.

کنترل تغییرات دمای باتری در روش پیشنهادی توسط بهبود مدل باتری و افزودن قیدهایی برای حد بالا و پایین دما انجام شد. شاخص عملکرد در این روش تنها تابعی از میزان مصرف سوخت بود و شاخصی برای عملکرد باتری در آن گنجانده نشد. به عنوان کار آینده برای بهبود روشپیشنهادی و کاهش مصرف سوخت می‌توان فرسودگی باتری را به عنوان تابعی از دمای آن مدل کرد و به تابع هزینه اضافه نمود.

مراجع

[1] L. Guzzella and A. Sciarretta, Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization, Springer, 2013.

[2] A. A. Malikopoulos, "Supervisory Power Management Control Algorithms for Hybrid Electric Vehicles: A Survey," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 15, no. 5, pp. 1869-1885, 2014.

[3] M. P. O'Keefe and T. Markel, "Dynamic Programming Applied to Investigate Energy Management Strategies for a Plug-in HEV," National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[4] K. Namwook, C. Sukwonand P. Huei, "Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 5,pp. 1279-1287, 2011.

[5] L. Serrao et al., "Open Issues in Supervisory Control of Hybrid Electric Vehicles: A Unified Approach Using Optimal Control Methods," Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, vol. 68, no. 1,pp. 23-33, 2013.

[6] G. Paganelli et al.,"Equivalent Consumption Minimization Strategy for Parallel Hybrid Powertrains," in IEEE 55th Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2002.

[7] L. Serrao et al., "Optimal Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Including Battery Aging," in American Control Conference (ACC), IEEE 2011.

[8] C. H.Zheng et al., "TheEffect of Battery Temperature on Total Fuel Consumption of Fuel Cell Hybrid Vehicles," International Journal of Hydrogen Energy,vol. 38, no. 13, pp. 5192-5200, 2013.

[9] D.E. Kirk, Optimal Control Theory: An Introduction, Courier Corporation,2012

[10] X. Lin et al., "Online Parameterization of Lumped Thermal Dynamics in Cylindrical Lithium Ion Batteries for CoreTemperature Estimation and Health Monitoring," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 5, pp. 1745-1755, 2013.

[11] Y. Hu et al., "Electro-Thermal Battery Model Identification for Automotive Applications," Journal of Power Sources, vol. 196, no. 1, pp. 449-457, 2011.

[12] A. Cordoba-Arenas, S. Onori and G. Rizzoni, "A Control-Oriented Lithium-ion Battery Pack Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Cycle-Life Studies and System Design withConsideration of Health Management," Journal of Power Sources, vol. 279,pp. 791-808, 2015.

[13] G.Suri and S. Onori, "A Control-Oriented Cycle-Life Model for Hybrid Electric Vehicle Lithium-ion Batteries," Energy, vol. 96,pp. 644-653,2016.

[14] A. Cordoba-Arenas et al., "Capacity and Power Fade Cycle-Life Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-ion Battery Cells Containing Blended Spinel and Layered-Oxide Positive Electrodes," Journal of Power Sources, vol. 278,pp. 473-483,2015.

[15] R.Mahamudand C. Park, "Reciprocating Air Flow for Li-ion Battery Thermal Management to Improve Temperature Uniformity," Journal of Power Sources, vol. 196, no. 13,pp. 5685-5696, 2011.

[16] H.Park, , "A Design of Air Flow Configuration for Cooling Lithium-ion Battery in Hybrid Electric Vehicles," Journal Of Power Sources, vol. 239(Supplement C), pp. 30-36,2013.

[17] D. Di Domenico, E. Prada and Y. Creff, "An Adaptive Strategy for Li-ion Battery Internal State Estimation," Control Engineering Practice, vol. 21, no. 12, pp. 1851-1859, 2013.

[18] J. Kalawoun et al., "From a Novel Classification of the Battery State of Charge Estimators Toward a Conception of an Ideal One," Journal of Power Sources, vol. 279,pp. 694-706,2015.

[19] J. Sun et al., "LiFePO4 Optimal Operation Temperature Range Analysis for EV/HEV," International Conference on Life System Modeling and Simulation and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment, pp. 476-485, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

[20] L. Serrao et al., Optimal Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Including Battery Aging. In: Proceedings Of The IEEE American Control Conference (ACC), San Francisco, Ca, Jun 29–Jul 1, 2011.

[21] S. Ebbesen, P. Elbert, and L. Guzzella, "Battery State-of-Health Perceptive Energy Management for Hybrid Electric Vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 7, pp. 2893–2900, Sep., 2012.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]

[22] T. M. Padovani et al., "Optimal Energy Management Strategy Including Battery Health Through Thermal Management for Hybrid Vehicles," IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, no. 21, pp. 384-389, 2013.

[23] L. Tang, G. Rizzoni, and S. Onori, "Energy Management Strategy for HEVs Including Battery Life Optimization," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, October 2016.

[24] T. Yuksel et al., "Plug-in Hybrid Electric Vehicle LiFePO4 Battery Life Implications of Thermal Management, Driving Conditions, and Regional Climate." Journal of Power Sources, vol. 338, pp. 49-64, 2017.

[25] M. Jafari et al., "Electric Vehicle Battery Cycle Aging Evaluation in Real-World Daily Driving and Vehicle-To-Grid Services." IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no .1, pp. 122-134, 2018.

[26] T. Nüesch et al., "Equivalent Consumption Minimization Strategy for the Control of Real Driving NOx Emissions of a Diesel Hybrid Electric Vehicle," Energies, vol. 7, no. 5,pp. 3148-3178, 2014.

[27] A. Pesaran, M. Keyser and S. Burch,"An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs," National Renewable EnergyLaboratory, Golden, CO (US), 1999.

[28] D. Bernardi, E. Pawlikowski and J. Newman, "A General Energy Balance for Battery Systems," Journal Of the Electrochemical Society, vol. 132, no. 1, pp. 5-12, 1985.

[29] K. B. Wipke et al., "ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach." IEEE transactions on vehicular technology, vol. 48, no. 6, pp. 1751-1761, 1999.

[30] T. Markel et al., " ADVISOR: a Systems Analysis Tool for Advanced Vehicle Modeling." Journal of power sources, vol. 110, no. 2, pp. 255-266, 2002.

[31] T. Barlow et al., "A Reference Book of Driving Cycles for Use in The Measurement of Road Vehicle Emissions," TRL Published Project Report, 2009.

[32] A.Sciarrettaand L. Guzzella, "Control of Hybrid Electric Vehicles," Control systems, IEEE,vol. 27, no. 2,pp. 60-70, 2007.

[33] R.E.Bellman and S.E. Dreyfus, Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, 2015.

[34] D. P. Bertsekas, Dynamic Programming and Optimal Control. vol. 1, Belmont, MA: Athena scientific, 1995.

[35] X. Wang et al., "Application Study on the Dynamic ProgrammingAlgorithm for Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles," Energies,vol. 8, no. 4, pp. 3225-3244, 2015.

[36] O.Sundstrom and L. Guzzella. "A Generic Dynamic Programming Matlab Function," In 2009 IEEE Control Applications, (CCA) &Intelligent Control, (ISIC), 2009.

[37] P. Elbert, S. Ebbesen and L. Guzzella, "Implementation of Dynamic Programming for n-Dimensional Optimal Control Problems With Final State Constraints," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 3, pp. 924-931, 2017.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.1.8]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.1]