

استراتژی مدیریت انرژی چندسطحی در خودروی پیل سوختی بر مبنای بازده ترکیبی باتری و شناسایی حالت عملکرد خودرو

حامد فرهادی قریبه^۱، احمد صادقی یزدانخواه^{۲*}، محمدرضا عزیزیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری برق-قدرت، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

h_farhadi@sut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

sadeghi@sut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

azizian@sut.ac.ir

چکیده: طراحی استراتژی مدیریت انرژی برخط، یکی از چالش‌های عمده در راستای توسعه خودروهای پیل سوختی است. استراتژی ارائه شده باید به خوبی پاسخ‌گوی توان مورد نیاز خودروی پیل سوختی برای پیمایش مسیر، شتاب‌گیری و شرایط مختلف رانندگی باشد و منجر به کاهش مصرف سوخت، افزایش طول عمر منابع توان و افزایش بازده کلی سیستم تغذیه شود. هدف این مقاله، شناسایی دقیق حالت‌های مختلف عملکردی خودرو، تفکیک وضعیت شارژ باتری بر مبنای بازده ترکیبی و محاسبات ریاضی، تعیین میزان ارزش هر گرم سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی، سطح‌بندی توان تولیدی پیل سوختی، استخراج سریع اطلاعات مورد نیاز و توزیع بهینه توان با در نظر گرفتن بازده و طول عمر است. در این مقاله یک استراتژی نوین مدیریت انرژی برخط چندسطحی ارائه می‌شود که مبتنی بر کنترل مد عملیاتی بوده و با هدف کمینه‌سازی مصرف معادل عمل می‌کند. همچنین شارژ باتری در نقطه بهینه پیل سوختی انجام می‌شود تا علاوه بر افزایش بازده کلی، پاسخ‌گوی توان‌های لحظه‌ای بیشینه در زمان‌های بعدی باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی استراتژی پیشنهادی منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده مصرف انرژی در مقایسه با سایر روش‌های مدیریت انرژی شده است.

واژه‌های کلیدی: استراتژی مدیریت انرژی، بازده ترکیبی باتری، بازده مصرف انرژی، پیل سوختی، کمینه‌سازی مصرف معادل، کنترل مد عملیاتی.

۱. مقدمه

۱.۱. انگیزه پژوهش

افزایش نگرانی در زمینه تأمین انرژی مورد تقاضا، کمبود شدید منابع انرژی تجدیدناپذیر، مضرات زیست‌محیطی، آلودگی هوا در مناطق شهری و انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب شده است تا توسعه صنعت حمل‌ونقل مبتنی بر منابع تغذیه پاک به‌عنوان یکی از راهکارهای ویژه کاهش نگرانی‌ها در این زمینه مطرح شود [۱]. هرچند وسایل نقلیه الکتریکی محض راه‌حلی بسیار مناسب در این زمینه به نظر می‌رسند، باتری‌های موجود در بازار قادر به تأمین انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی محض برای مسافت‌های طولانی نیستند [۲]؛ بنابراین استفاده از سایر منابع تغذیه کمکی همانند ابرخازن [۳]، پیل سوختی و فتولتائیک [۴] از جمله مواردی هستند که در راستای توسعه وسایل نقلیه پاک در نظر گرفته شده‌اند و بررسی‌ها نشان می‌دهد خودروی الکتریکی پیل سوختی^۱ (FCEV) یک جایگزین ایدئال برای موتورهای احتراق داخلی است [۵].

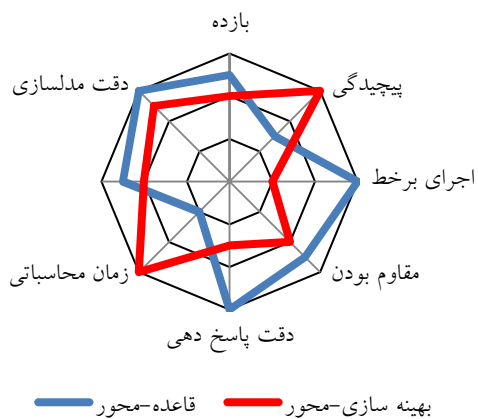
هرچند سیستم‌های پیل سوختی به‌عنوان یکی از منابع تولید انرژی الکتریکی اهمیت بسیاری دارند، به‌تنهایی قادر به تأمین توان بارهای دینامیکی و بالخصوص در کاربردهای دینامیک سریع نیستند [۶] و در عین حال می‌توان از منابع ذخیره‌ساز انرژی^۲ (ESS) با چگالی توان و یا انرژی بالا برای بهبود مدیریت انرژی استفاده کرد [۷].

چگالی انرژی بالای منابع ذخیره‌ساز انرژی منجر به افزایش مسافت رانندگی می‌شود و خودروی پیل سوختی باید شامل مزایای دوگانه و متمایز منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی باشد [۸]. بنابراین افزودن باتری به سامانه هیبریدی تأمین انرژی الکتریکی در خودروی پیل سوختی سبب بهبود عملکرد منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌شود.

پس از انتخاب منابع ذخیره‌ساز انرژی، پیاده‌سازی یک استراتژی مدیریت انرژی^۳ (EMS) بهینه بر روی FCEV می‌تواند منجر به افزایش قابلیت رقابت‌پذیری و قابلیت اطمینان خودروهای الکتریکی پیل سوختی شود [۹]. استراتژی مدیریت انرژی در مراجع مختلف با اهداف گسترده‌ای از قبیل کاهش مصرف سوخت، کاهش انتشار آلاینده‌ها، رعایت محدوده مجاز وضعیت شارژ^۴ (SoC) باتری و افزایش بازده کلی پیشنهاد شده‌اند [۱۰].

۲.۱. پیشینه ادبیات

مدیریت انرژی در خودروهای الکتریکی به دو دسته برخط^۵ و برون‌خط^۶ تقسیم می‌شوند. روش برنامه‌ریزی دینامیکی به‌عنوان مؤثرترین روش بهینه‌سازی سراسری برون‌خط مطرح است، اما نیاز به آگاهی قبلی از سیکل رانندگی و مدت‌زمان اجرای طولانی آن، سبب ایجاد مشکلاتی در اجرای برخط آن می‌شود [۱۱]. استراتژی مدیریت انرژی برخط را می‌توان به دو گروه قاعده‌محور^۷ و بهینه‌سازی‌محور^۸ تقسیم‌بندی کرد که مزایا و معایب هرکدام از آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۲]. هدف اصلی در مدیریت قاعده‌محور، تعیین میزان مشارکت هریک از منابع در تأمین توان مورد تقاضا در هر لحظه از زمان است. در مدیریت قاعده‌محور بهره‌برداری از منابع معمولاً در نقاط غیر بهینه اتفاق می‌افتد. درحالی‌که اغلب برای کاهش میزان مصرف سوخت هیدروژن، افزایش طول عمر پیل سوختی و افزایش میزان مسافت پیموده‌شده از روش بهینه‌سازی‌محور استفاده می‌شود [۱۳].



شکل (۱): دیاگرام مقایسه‌ای استراتژی مدیریت انرژی برخط [۱۲]

در مدیریت قاعده‌محور، میزان مشارکت هریک از منابع در تولید توان، بستگی به قواعد تصمیم‌گیری در هر لحظه از زمان دارد. این قواعد می‌توانند توسط مراکز تحقیقاتی، افراد متخصص، روش‌های ابتکاری، مدل ریاضی و یا حتی با پیش‌بینی شرایط رانندگی پایه‌گذاری شوند. EMS قاعده‌محور از طریق روش‌های محاسباتی و منطق‌فازی قابل اجراست. روش‌های مختلفی برای تصمیم‌گیری قاعده‌محور محاسباتی وجود دارد که می‌توان به روش‌های استراتژی کنترل شارش توان، استراتژی ترموستات، استراتژی کنترل ماشین حالت^۹ (SMCS)، استراتژی شارش توان اصلاح‌شده، استراتژی کنترل مد ضرایب استحکام

5. Online
6. Offline
7. Rule-based
8. Optimization-based
9. State Machine Control Strategy

1. Fuel Cell Electric Vehicle
2. Energy Storage System
3. Energy Management Strategy
4. State of Charge

است. پارامترهای کنترلی منطق فازی در این پژوهش توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم شده‌اند و محدوده مجاز آن‌ها از طریق تابع چندهدفه به‌ازای سیکل‌های رانندگی مختلف بهینه‌سازی شده است. استراتژی پیشنهادی بر روی ۲۲ سیکل رانندگی متفاوت تحت نرم‌افزار ADVISOR اعمال شده است و نتایج حاکی از کاهش هزینه سوخت مصرفی، بهبود عملکرد خودرو، قابلیت شارژ باتری و توزیع بهینه انرژی در میان منابع تغذیه است.

در مرجع [۲۲]، یک چهارچوب شبیه‌سازی از طریق ترکیب استراتژی کنترلی ترموستات و منطق فازی با هدف افزایش مسافت رانندگی ارائه شده است. در مرجع مذکور، از نرم‌افزارهای Cruise و MATLAB برای شبیه‌سازی خودروی پیل سوختی استفاده شده است. منطق فازی آن فقط ۲ ورودی (SoC باتری و توان مورد تقاضا) دارد و خروجی حاصل از آن توان باتری را پیشنهاد می‌کند. اختلاف میان توان باتری و توان مورد تقاضا به‌عنوان توان تولیدی پیل سوختی در نظر گرفته شده و چهار مدار ساده شروع-توقف برای منبع باتری-پیل سوختی تعریف شده است. هدف استراتژی مذکور فقط افزایش مسافت رانندگی است و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد استراتژی پیشنهادی نسبت به استراتژی ترموستات عملکرد بهتری دارد. در مرجع مذکور، باتری به‌صورت مداری یا ریاضی مدل‌سازی نشده، فقط از یک منحنی برای نمایش بازده پیل سوختی استفاده شده است. همچنین سیکل‌های رانندگی معتبری به آن اعمال نشده است.

۳.۱. جنبه ابتکاری

هرچند در سال‌های اخیر، مطالعه بر روی استراتژی مدیریت انرژی به‌منظور اطمینان از عملکرد پایدار و مؤثر منابع تغذیه افزایش یافته، هنوز هم توسعه استراتژی مدیریت انرژی یک مسئله بحرانی در FCEV است. استراتژی‌های ارائه‌شده به یک تکامل جامع دست نیافته‌اند و بسیاری از آن‌ها فقط بر روی تعیین توان هرکدام از منابع تمرکز کرده درحالی‌که از مسائل مختلفی از قبیل طول عمر، استرس‌های وارده، بازده منابع و... چشم‌پوشی کرده‌اند. بنابراین توسعه یک EMS جدید، یک راهکار جدی در پیشرفت FCEV است و می‌تواند عملکرد آن را بهبود دهد. گستردگی اهداف مختلف سبب شده است تا یک استراتژی مدیریت انرژی به‌تنهایی قادر به برآورده ساختن شرایط مختلف رانندگی در حالت برخط نباشد؛ بنابراین در این مقاله از استراتژی مدیریت انرژی چندگانه برای FCEV استفاده شده است تا بتواند بر مبنای تشخیص شرایط رانندگی قادر به مدیریت انرژی در خودرو باشد.

مطابق آخرین دانسته‌های ما، در استراتژی‌های مختلف مدیریت انرژی، محدوده‌بندی SoC باتری به‌صورت تجربی انجام می‌شود و بازده

و استراتژی کنترل مد عملیاتی^۱ (OMCS) اشاره کرد [۱۴]. روش‌های مدیریت انرژی بهینه‌سازی محور می‌توانند مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین، استراتژی کمینه‌سازی مصرف معادل^۲ (ECMS)، کنترل‌های هوشمند، روش‌های کنترل مقاوم و... باشند [۱۴]. در میان روش‌های بهینه‌سازی محور، روش کمینه‌سازی مصرف معادل قادر است در مدت‌زمان کوتاهی نقطه بهینه سراسری را تضمین کند [۱۵]. اگرچه ECMS یک محدوده نزدیک به نقطه بهینه را پیشنهاد می‌کند، بررسی‌ها نشان می‌دهد که نقطه بهینه در ECMS و نقطه بهینه در روش‌های برون‌خط می‌تواند تا ۱۰٪ اختلاف داشته باشد [۱۶].

در سال‌های اخیر، استراتژی مدیریت انرژی تلفیقی با استفاده از مفاهیم هر دو دسته بهینه‌سازی محور و قاعده‌محوری افزایش یافته است. در مرجع [۱۷]، نخست از طریق برنامه‌ریزی دینامیکی برون‌خط، الگوریتم بهینه‌سازی به‌ازای سیکل‌های رانندگی مختلف اجرا شده و تابع هدف (کاهش مصرف سوخت) به کمترین مقدار خود رسیده است. سپس یک استراتژی برخط از طریق منطق فازی برای افزایش قابلیت کنترل لحظه‌ای خودرو در فضای واقعی رانندگی معرفی شده است. مرجع [۱۸] با استفاده از استراتژی تلفیقی کنترل ماشین حالت و بازیابی توان تولید اضافی پیل سوختی به مدیریت توان در یک خودرو الکتریکی پرداخته و استراتژی کنترل ماشین حالت در آن بر اساس تفکیک حالات حرکت/ ترمزگیری/ توقف پایه‌گذاری شده است.

در مرجع [۱۹] از یک استراتژی تلفیقی استفاده شده است که قادر است پیل سوختی را در بازده بالایی به کار گیرد و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در مصرف هیدروژن شود. در مرجع مذکور، پارامترهای کنترل منطق فازی از طریق روش تئوری شواهد تدریجی (Dempster-Shafer) به‌ازای سه سیکل رانندگی بهینه‌سازی شده‌اند. سپس از روش PSVM^۳ برای طبقه‌بندی الگوهای چرخه رانندگی برخط استفاده شده است. مدیریت انرژی در مرجع [۲۰] از طریق شبکه عصبی و مدل دینامیکی با هدف کمینه‌سازی مصرف انرژی معادل طراحی شده است. استفاده از شبکه‌های عصبی امکان مدیریت انرژی در زمان واقعی را برای خودروی الکتریکی هیبریدی پیل سوختی امکان‌پذیر کرده است. شبکه عصبی بهترین عملکرد را در سیکل رانندگی HWFET نشان می‌دهد که در مصرف انرژی معادل ۲٪ صرفه‌جویی شده است.

در مرجع [۲۱] استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی بر مبنای روش جدید توزیع توان و به کمک تکنیک هوشمند کنترل فازی اجرا شده

1. Operational Mode Control Strategy
2. Equivalent Consumption Minimization Strategy
3. Probabilistic Support Vector Machine

خودرو است که مطابق روابط (۱) و (۲) بیان می‌شود.

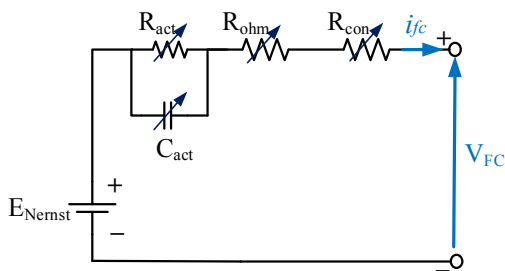
$$P_{wheels} = v(ma + 0.5\rho C_d A_f v^2 + C_{rr}mg \cos \theta + mg \sin \theta) \quad (1)$$

$$P_{demand} = \frac{P_{wheels}}{\eta_{drivetrain}} + P_{auxiliary} \quad (2)$$

که در آن، P_{wheels} توان مورد نیاز خودرو، P_{demand} توان منابع تغذیه، $P_{auxiliary}$ توان تجهیزات آسایشی، $\eta_{drivetrain}$ راندمان انتقال قدرت، v سرعت خودرو، m جرم خودرو، g ثابت گرانش، θ شیب مسیر، ρ چگالی هوا، C_D ضریب درگ، A_f سطح مقطع قسمت جلویی خودرو، C_{rr} ضریب مقاومت غلطشی و a شتاب خودروی الکتریکی است.

۲.۱. مدل پیل سوختی

کنترل دقیق دینامیک پیل سوختی امری اساسی در مدیریت انرژی است. بدین منظور، مدار معادل الکتریکی PEMFC بر اساس مدل دینامیکی در شکل (۲) ارائه شده که در آن C_{act} خازن معادل فعال‌سازی واکشن، R_{act} مقاومت معادل فعال‌سازی واکشن، R_{ohm} مقاومت معادل تلفات اهمی و R_{con} مقاومت معادل افت ولتاژ ناشی از اشباع غلظت گاز اکسیژن است. ولتاژ خروجی پیل سوختی (V_{FC}) ناشی از اختلاف میان ولتاژ تولیدی توسط واکنش شیمیایی (E_{Nernst}) و افت ولتاژهای موجود در مسیر آن است. ولتاژ تولیدی توسط واکنش شیمیایی وابسته به نوع پیل سوختی (ضرایب α)، T_{st} دمای عملکردی، P_{H_2} فشار هیدروژن ورودی و P_{O_2} فشار اکسیژن ورودی وابسته است و مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۳].



شکل (۲): مدار معادل الکتریکی PEMFC بر اساس مدل دینامیکی [۲۳]

$$E_{Nernst} = \alpha_1 + \alpha_2 (T_{st} - 298.15) + \alpha_3 T_{st} (\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})) \quad (3)$$

محدوده فعال‌سازی پیل سوختی بیانگر بخش اصلی رفتار دینامیکی پیل سوختی است. محاسبه ظرفیت خازنی و مقاومت معادل فعال‌سازی نیازمند دستیابی به اضافه ولتاژ فعال‌سازی (V_{act}) و میزان اشباع غلظت گاز اکسیژن (C_{O_2}) است که مطابق روابط (۷) - (۴) محاسبه می‌شوند. i_g ها ضرایب برازش و i_{FC} جریان پیل سوختی است. ولتاژ فعال‌سازی (V_{FC}) به کمک روابط (۶) و (۷) و از طریق یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

شارژ/دشارژ باتری نقشی در تعیین محدوده‌ها ندارد. نوسانات توان تولیدی پیل سوختی به صورت مؤثر کاهش نمی‌یابد و مراحل شناسایی شرایط رانندگی بر اساس مقایسه سیکل‌های رانندگی انجام می‌شود. برای غلبه بر چالش‌های ذکر شده، موارد زیر در این مقاله ارائه و اجرا شده است:

- تابع جدیدی بر اساس شتاب، سرعت و توان مورد تقاضا تعریف شده که قادر است حالات مختلف حرکت خودرو را تشخیص دهد.
- فرمول بازده ترکیبی برای باتری لیتیوم-یون استخراج شده و محدوده‌بندی وضعیت شارژ باتری بر اساس بازده ترکیبی، امید ریاضی و انحراف معیار استاندارد انجام شده است.
- میزان ارزش سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی با لحاظ کردن بازده شارژ/دشارژ باتری در راستای اجرای ECMS محاسبه شده است.
- طبقه‌بندی حالات مختلف مدیریت انرژی بر اساس وضعیت شارژ باتری، عملکرد دینامیکی خودرو و بازده کلی سیستم تغذیه در راستای اجرای OMCS انجام یافته است.
- سرانجام، استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر تلفیق کنترل ماشین حالت، کنترل مد عملیاتی و کمینه‌سازی مصرف معادل برای مدیریت انرژی در خودروی پیل سوختی ارائه شده است.

۱.۴. ساختار مقاله

مطالب این مقاله در پنج بخش بیان شده است. در بخش دوم مفاهیم تئوری و چهارچوب مدل منابع توان (پیل سوختی و باتری) معرفی می‌شوند. استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی شامل مباحث استراتژی کنترل ماشین حالت، استراتژی کمینه‌سازی مصرف معادل و استراتژی کنترل مد عملیاتی مبتنی بر ECM و همچنین شناسایی شرایط رانندگی خودرو در بخش سوم مطرح می‌شوند. نتایج حاصل از استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی در بخش چهارم از طریق مدل‌سازی در نرم‌افزار MATLAB ارائه شده است. در بخش پنجم به نتیجه‌گیری و بحث پرداخته می‌شود.

۲. چهارچوب مدل خودروی پیل سوختی

منابع تغذیه اصلی (پیل سوختی) و کمکی (باتری) در خودروی پیل سوختی باید قادر به تأمین توان مورد نیاز خودرو برای حرکت، شتاب‌گیری و پیمایش شیب در شرایط مختلف باشند. برای مدیریت منابع انرژی لازم است توان مورد نیاز FCEV برای پیمایش مسیرهای مختلف محاسبه شود. این توان وابسته به نیروهای شتاب‌گیری، آیرودینامیکی، غلطشی، گرانشی و سایر پارامترهای مرتبط با مشخصات

$$\eta_{FC} = \frac{V_{FC} i_{FC} - P_{aux}}{m_{H_2} \Delta H} \quad (15)$$

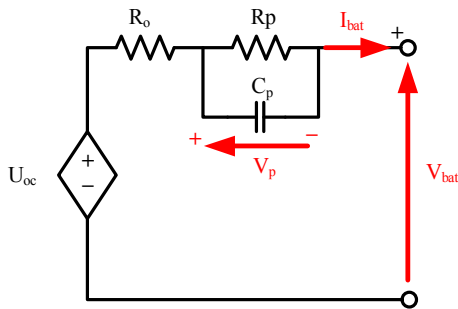
که در آن P_{aux} توان کمکی، m_{H_2} نرخ هیدروژن مصرفی و ΔH تغییرات آنتالپی هیدروژن است. همچنین میزان مصرف سوخت هیدروژن نیز در PEMFC از طریق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$m_{H_2} = \int \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC} \times \rho_{H_2}} dt \quad (16)$$

که در آن $P_{FC}(t)$ توان خروجی پیل سوختی و ρ_{H_2} چگالی انرژی شیمیایی هیدروژن مولی هیدروژن است.

۲.۲. مدل باتری

در میان باتری‌های مختلف، باتری Li-ion به دلیل چرخه زندگی و چگالی انرژی بالا به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای کاربرد در خودروهای الکتریکی مطرح است [۲۵]. مدل دقیق باتری برای حصول از قابلیت تأمین بهینه توان الزامی است. مدل دینامیکی باتری به مقادیر پارامترهای داخلی و SoC وابسته است و تحلیل دقیق آن نقش مهمی در مدیریت انرژی دارد. چهارچوب مدل باتری Li-ion بر مبنای مدار معادل در شکل (۳) نشان داده شده است و پارامترهای آن از طریق روش رگرسیون در مرجع [۲۶] شناسایی شده‌اند.



شکل (۳): مدار معادل الکتریکی باتری لیتیوم-یون [۲۶]

مدار معادل باتری Li-ion از سه قسمت مختلف تشکیل شده است: (۱) ولتاژ مدار باز، (۲) مقاومت سری R_o ، (۳) شبکه مقاومت-خازن موازی شده که برای مدل‌سازی دینامیک آهسته پدیده قطبی‌سازی باتری Li-ion استفاده می‌شود. ولتاژ باتری Li-ion طی شارژ و دشارژ مطابق رابطه (۱۷) بیان می‌شود. همچنین SoC باتری یک پارامتر تأثیرگذار در استراتژی مدیریت انرژی و چرخه زندگی باتری است که از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$\begin{cases} V_{bat} = U_{oc} - R_o I_{bat} - V_p \\ \dot{V}_p = -\left(\frac{1}{R_p C_p}\right) V_p + \left(\frac{1}{C_p}\right) I_{bat} \end{cases} \quad (17)$$

$$SoC = SoC_0 - \frac{\int_0^t I_{bat} dt}{Q_e} \quad (18)$$

که در آن U_{oc} ولتاژ مدار باز باتری، R_o مقاومت سری، R_p مقاومت

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 T_{st} + \xi_3 T_{st} (\ln(C_{O_2}) + \xi_4 T_{st} \ln(i_{FC}))] \quad (4)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-\frac{498}{T_{st}})} \quad (5)$$

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{i_{FC}} \quad (6)$$

$$C_{act} = \frac{l}{\xi_5 R_{act}} \quad (7)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{l}{C_{act}} \left(i_{FC} - \frac{V_c}{R_{act}} \right) \quad (8)$$

مقاومت معادل تلفات اهمی از یک مقاومت ثابت (R_c) و یک مقاومت متغیر برای مدل‌سازی رفتار غشا (R_m) تشکیل شده است. مقاومت ویژه غشا (ρ_m) مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود که در آن λ_m گنجایش متوسط آب در غشا است. همچنین مقاومت متغیر غشا توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن l طول استک و A سطح مقطع آن است. سپس افت ولتاژ ناشی از تلفات اهمی از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\rho_m = \frac{181.6 [1 + 0.03(\frac{i_{FC}}{A}) + 0.062(\frac{T_{st}}{303})^2 (\frac{i_{FC}}{A})^{2.5}]}{[\lambda_m - 0.0634 - (\frac{i_{FC}}{A})] \exp[4.18(T_{st} - \frac{303}{T_{st}})]} \quad (9)$$

$$R_M = \frac{\rho_m l}{A} \quad (10)$$

$$V_{ohm} = i_{FC} (R_M + R_c) \quad (11)$$

افت ولتاژ ناشی از اشباع غلظت گاز اکسیژن ($V_{concent}$) به چگالی جریان پیل سوختی (j) و چگالی جریان ماکزیمم (j_{max}) وابسته است که مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود و در آن R ثابت گازها ($J/(\text{mol.K})$) و F ثابت فارادی (96485 C/mol) است. ولتاژ سلول پیل سوختی پس از محاسبه روابط فوق، از طریق رابطه (۱۳) و ولتاژ خروجی پیل سوختی توسط رابطه (۱۴) به دست می‌آید که در آن N تعداد سلول‌های پیل سوختی است.

$$V_{concent} = -\frac{RT_{st}}{2F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right) \quad (12)$$

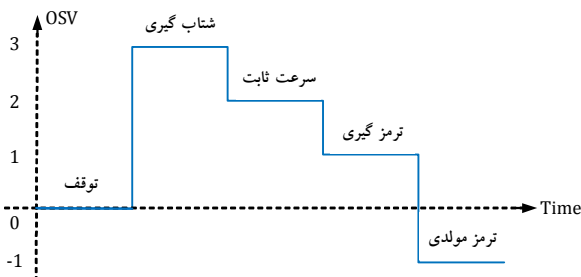
$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_c - V_{ohm} - V_{concent} \quad (13)$$

$$V_{FC} = N V_{cell} \quad (14)$$

اگرچه استک پیل سوختی قلب سیستم است، اجزای جانبی همانند کمپرسور هوا، مرطوب‌کننده، تنظیم فشار و میزان گردش سیال نقش بسزایی در کارکرد سامانه دارد [۲۴]. شایان ذکر است قسمتی از توان تولیدی پیل سوختی توسط اجزای کمکی مصرف می‌شوند. بنابراین در محاسبه بازده سیستم پیل سوختی باید لحاظ شوند. بازده استک و سیستم تهویه پیل سوختی از طریق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

در این پژوهش، حالات مختلف عملکردی خودرو بر اساس رابطه (۱۹) به پنج دسته زیر مطابق شکل (۵) تفکیک می‌شود:

- حالت ترمز مولدی: ($OSV = -1$),
- حالت توقف: ($OSV = 0$),
- حالت ترمز گیری: ($OSV = 1$),
- حالت حرکت با سرعت ثابت: ($OSV = 2$),
- حالت شتاب گیری: ($OSV = 3$).



شکل (۵): تفکیک حالات مختلف عملکردی خودرو

۳.۲. استراتژی کمینه‌سازی مصرف معادل پیشنهادی

نقش منبع ذخیره انرژی در بهبود بازده مصرف انرژی و قابلیت دریافت انرژی ترمز مولدی حائز اهمیت است. ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، قابلیت تأمین بیشینه توان مورد نیاز (توان ویژه) و بازده شارژ/دشارژ باتری از جمله مواردی هستند که باید به صورت دقیق تعیین شوند. در جدول (۱)، مشخصات باتری قابل شارژ لیتیوم-یون نشان داده شده است. پارامترهای مدار معادل باتری تابعی از SoC هستند. ولتاژ مدار باز باتری از طریق آزمایش پالس جریان ثابت به دست آمده است. همچنین مقدار U_{oc} در حین شارژ و دشارژ متفاوت است. مطابق بررسی‌های انجام شده در مرجع [۲۶]، مقدار خطای تخمین ولتاژ ۴۰ میلی‌ولت است. بنابراین دقت عملکردی مدار معادل رضایت‌بخش است. مقادیر حاصل از آزمایش پالس جریان ثابت و مقدار مقاومت باتری در شرایط مختلف در جدول (۲) برای باتری ارائه شده است [۲۶]. حداقل و حداکثر SoC در بازه $[0.1-0.9]$ فرض شده است. گفتنی است مطابق مرجع مذکور، مدل ارائه شده و پارامترهای شناسایی آن دارای دقت بسیار بالا و محدوده خطای بسیار کوچک است.

جدول (۱): مشخصات باتری لیتیوم-یون [۲۶]

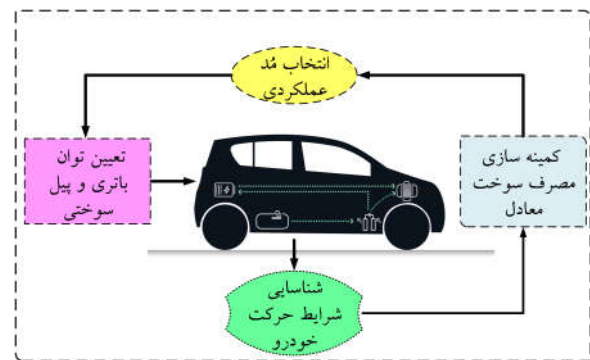
مشخصات	مقدار	واحد
توان نامی سلول	۴۰	وات
ولتاژ نامی سلول	۳/۲	ولت
ظرفیت نامی سلول	۱۲/۵	آمپر ساعت
تعداد سلول‌های سری	۲۳	عدد
تعداد سلول‌های موازی	۵	عدد

موازی با خازن، C_p خازن معادل، V_p ولتاژ خازن موازی شده، I_{bat} جریان، SoC_0 وضعیت شارژ اولیه باتری و Q_e ظرفیت باتری است.

۳. استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی

خودروهای پیل سوختی به‌عنوان جایگزین مناسب برای خودروهای احتراقی مطرح‌اند. هرچند بازده پیل سوختی نسبت به موتورهای احتراقی بسیار بیشتر است، تحقیقات برای کاهش مصرف سوخت هیدروژن ادامه دارد. علاوه بر موارد فوق، خودروهای پیل سوختی برای تجاری سازی و فراگیر شدن نیاز به تأمین پارامترهایی از قبیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن سوخت آن‌ها، هزینه پایین و طولانی بودن مدت زمان مداوم عملکردی آن دارند.

روش‌های مختلف مدیریت انرژی در چندین دسته طبقه‌بندی می‌شوند، اما ایده‌های استراتژی کنترل مد عملیاتی، استراتژی کمینه‌سازی مصرف معادل و استراتژی کنترل ماشین حالت روش‌هایی هستند که در پژوهش حاضر برای مدیریت انرژی خودروی پیل سوختی از مفاهیم موجود در آن‌ها مطابق شکل (۴) استفاده شده است.



شکل (۴): طرح‌واره مدیریت انرژی پیشنهادی

۳.۱. استراتژی کنترل ماشین پیشنهادی

روش کنترل ماشین حالت در زمره روش‌های قاعده‌محور محاسباتی قرار دارد و امکان مدیریت زمان واقعی (real time) را فراهم می‌کند. اجرای SMCS بر مبنای تغییرات توان مورد تقاضای راننده استوار است و می‌توان حالات مختلفی را برای آن تعریف کرد. اما اگر این استراتژی به‌تنهایی استفاده شود، تضمینی برای کارکرد منابع در نقاط بهینه وجود نخواهد داشت. مراجع پیشین عموماً از سه حالت شتاب‌گیری/ترمزگیری/توقف به‌عنوان حالات مختلف عملکردی استفاده کرده‌اند [۶]. اما در استراتژی پیشنهادی، برای تفکیک حالات مختلف عملکردی خودرو از توان مورد تقاضا (P_{demand}) سرعت و شتاب خودرو استفاده شده و فرمول‌بندی آن توسط رابطه (۱۹) ارائه شده است.

$$OSV(t) = \text{Sign}(P_{demand}(t)) + \text{Sign}(v(t)) + \text{Sign}(a(t))$$

(۱۹)

جدول (۲): پارامترهای باتری لیتیوم-یون [۲۶]

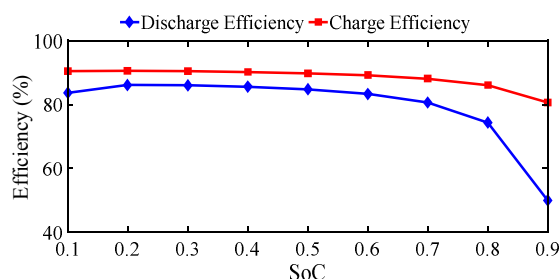
وضعیت شارژ باتری	مقاومت سری (mΩ)	مقاومت قطبی سازی (mΩ)	ولتاژ مدار باز شارژ (V)	ولتاژ مدار ولتاژ مدار باز دشارژ (V)
۰/۱	۹/۶	۲۰/۶	۳/۲۳	۲/۹۷۳
۰/۲	۹/۵	۲۱/۳	۳/۲۷۷	۳/۲۱۲
۰/۳	۹/۴	۲۲/۲	۳/۳۰۶	۳/۲۴۶
۰/۴	۹/۴	۲۳/۶	۳/۳۱۳	۳/۲۷۴
۰/۵	۹/۳	۲۵/۶	۳/۳۲۵	۳/۲۸۸
۰/۶	۹/۲	۲۸/۵	۳/۳۳۷	۳/۲۹۴
۰/۷	۹/۱	۳۳/۶	۳/۳۴۳	۳/۳۰۶
۰/۸	۹	۴۳/۷	۳/۳۴۷	۳/۳۲۵
۰/۹	۹	۷۵	۳/۳۵۹	۳/۳۳۳

بازده شارژ و دشارژ باتری به ولتاژ مدار باز، توان باتری و مقاومت داخلی آن وابسته است. وابستگی ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی باتری به SoC سبب شده است تا بازده باتری وابستگی غیرخطی با SoC داشته باشد. در این پژوهش بازده شارژ و دشارژ باتری در حالت ماندگار مطابق روابط (۲۱) و (۲۰) محاسبه شده است.

$$\eta_{chg}(SoC, P_{bat}) = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4(R_o(SoC) + R_p(SoC))P_{bat}}{U_{oc,chg}^2(SoC)}}} \quad (20)$$

$$\eta_{dis}(SoC, P_{bat}) = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4(R_o(SoC) + R_p(SoC))P_{bat}}{U_{oc,dis}^2(SoC)}}}{2} \quad (21)$$

برای کمیته سازی مصرف معادل لازم است تا شارژ و دشارژ باتری در حداکثر بازده ممکن انجام شود. بازده شارژ و دشارژ باتری به ازای توان اسمی مطابق روابط (۲۱) و (۲۰) محاسبه شده و نتیجه آن در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، حداکثر بازده شارژ باتری ۹۱٪ است که در وضعیت شارژ ۰/۲ اتفاق می افتد در حالی که حداکثر بازده دشارژ باتری ۸۶٪ است.



شکل (۶): بازده شارژ و دشارژ باتری لیتیوم-یون

علاوه بر محاسبه بازده شارژ و دشارژ باتری، لازم است تا میزان

ارزش هر میلی لیتر سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی تعیین شود تا در ادامه بتوان به خوبی از ایده ECMS استفاده کرد. سیستم PEMFC از چندین واحد تشکیل شده است که انباره پیل سوختی، واحد تغذیه هوا، واحد تغذیه هیدروژن، واحد مدیریت دما و واحد تهویه مطبوع از جمله آن هاست. سیستم یک پیل سوختی را می توان به انباره پیل سوختی و سامانه های کمکی آن تقسیم بندی کرد. در این مطالعه از انباره پیل سوختی ۵ کیلوواتی با سیستم خنک کننده هوا استفاده می شود که پارامترهای آن در جدول (۳) نشان داده شده است [۲۷].

جدول (۳): مشخصات PEMFC [۲۳]

مشخصات	مقدار	واحد
توان نامی	۵۰۰۰	وات
ولتاژ نامی	۷۲	ولت
جریان نامی	۷۰	آمپر
تعداد سلول	۱۲۰	عدد
حداکثر دمای انباره	۶۵	درجه سانتی گراد
فشار گاز هیدروژن	۰/۴۵-۰/۵۵	بار

روش تعیین ارزش هر گرم سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی در این مطالعه پیشنهاد شده و ارزش سوخت هیدروژن (HFV) به ازای هر وات توان الکتریکی مطابق رابطه (۲۲) تعریف شده است.

$$HFV = \frac{m_{H_2}}{P_{FC}} = \frac{\int \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC} \times \rho_{H_2}} dt}{V_{FC} i_{FC}} \quad (22)$$

در حال حاضر، تغییرات توان بار و شروع-توقف های متوالی به عنوان دو مسئله جدی در کاهش عملکرد و طول عمر پیل سوختی مطرح اند [۲۸]. در این پژوهش، بعد از تعیین ارزش هر میلی لیتر سوخت هیدروژن مصرفی، از امید ریاضی و انحراف معیار استاندارد برای تحلیل میزان پراکندگی و استفاده از مفهوم کاهش مصرف معادل بهره برده شده است. امید ریاضی ارزش سوخت هیدروژن به ازای هر وات (E(HFV)) به صورت رابطه (۲۳) تعریف می شود:

$$E(HFV) = \int_0^{P_{FC}} HFV_p \times P_H(HFV_p) dP_{FC} = \mu_{HFV} \quad (23)$$

که در آن، HFV_p ارزش سوخت هیدروژن به ازای توان های مختلف پیل سوختی و تابع توزیع احتمال آن ($P_H(HFV_p)$) به صورت توزیع یکنواخت در بازه [۰ - ۵۰۰۰] تعریف شده است. مقدار میانگین نرخ مصرف هیدروژن بر وات است، انحراف معیار استاندارد (σ_{HFV}) یک شاخص مقایسه ای دو بعدی است که میزان پراکندگی ارزش سوخت را از نقطه میانگین مشخص می کند و مطابق رابطه (۲۴) محاسبه می شود.

$$m_{equivalentH2} = \int \frac{P_{fc}(t)}{\eta_{FC} \times \rho_{H2}} dt + \frac{3600 \times \Delta SoC \times E_{bat}}{\eta_{FC} \times \eta_{chg} \times \eta_{conv} \times \rho_{H2}} \quad (25)$$

که در آن η_{conv} بازده تجهیزات الکترونیک قدرت، E_{bat} ظرفیت باتری برحسب کیلووات ساعت و ρ_{H2} چگالی انرژی شیمیایی هیدروژن برحسب ژول بر گرم است.

۳.۳. استراتژی کنترل مد عملیاتی پیشنهادی

روش کنترل مد عملیاتی یکی از روش‌های قاعده‌محور محاسباتی است که بر مبنای تفکیک مدهای مختلف عملکردی استوار است و قابلیت اجرای برخط را دارد. در OMCS پیشنهادی، برای دستیابی به نتایج مطلوب ECMS ارائه‌شده، بهره‌برداری از پیل سوختی در ۵ مد کاری مختلف با محوریت بازده محلی حداکثر برنامه‌ریزی شده است. با توجه به شکل (۷)، کمیته مصرف هیدروژن به‌ازای هر وات توان الکتریکی در توان ۱/۱۵ کیلووات اتفاق می‌افتد و اگر پیل سوختی در توان ۳/۵۲ کیلووات کار کند، میزان مصرف هیدروژن به‌ازای هر وات توان برابر با مقدار میانه آن خواهد بود. بنابراین این دو نقطه به‌عنوان نقاط بهینه و متوسط انتخاب شده‌اند. حالت خاموش و حداکثر توان خروجی به‌عنوان نقاط ابتدایی و انتهایی لحاظ شده‌اند. همچنین نقاط کاری سوم و پنجم نیز بر اساس حد واسط میانه و تقارن خط کمیته نسبت به خط میانه انتخاب شده‌اند تا ۶ مد کاری پیل سوختی [۵ و ۴، ۳/۵۲، ۱/۸۰، ۱/۱۵، ۰] تعیین شوند. علاوه بر این، بهره‌برداری بهینه پیل سوختی به وضعیت شارژ باتری وابسته است و وضعیت شارژ باتری باید به‌صورت دقیق تفکیک شود.

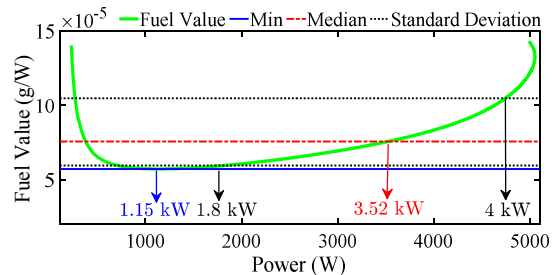
وضعیت شارژ یا دشارژ باتری در هر لحظه بسته به میزان توان مورد تقاضا در حال تغییر است. لذا در این پژوهش، برای تفکیک نواحی مختلف SoC باتری، بازده ترکیبی باتری (η_{BCE}) مطابق رابطه (۲۶) تعریف شده که در آن P_{bat} اندازه توان باتری، $U_{oc,chg}$ ولتاژ مدار باز باتری در حین شارژ و $U_{oc,dis}$ ولتاژ مدار باز باتری در حین دشارژ است. شکل (۸) منحنی بازده ترکیبی باتری لیتیوم-یون را به‌ازای توان و وضعیت شارژهای متفاوت نشان می‌دهد.

$$\eta_{BCE} = \frac{\eta_{chg}(SoC, P_{bat}) + \eta_{dis}(SoC, P_{bat})}{2} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{4(R_o(SoC) + R_p(SoC))P_{bat}}{U_{oc,chg}^2(SoC)}}} + \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{4(R_o(SoC) + R_p(SoC))P_{bat}}{U_{oc,dis}^2(SoC)}}} \quad (26)$$

$$\sigma_{HFV} = \sqrt{E[(HFV - \mu_{HFV})^2]} = \sqrt{\int_0^{P_{FC}} (HFV_p - \mu_{HFV})^2 \times P_H(HFV_p) dP_{FC}} \quad (24)$$

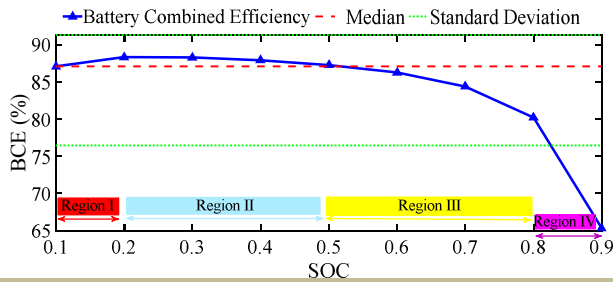
منحنی ارزش سوخت هیدروژن در شرایط مختلف کارکردی PEMFC در شکل (۷) نشان داده شده است. کمترین مقدار مصرف برابر $10^{-5} \times 5/72$ گرم بر ژول است که به‌ازای توان تولیدی ۱۱۵۰ وات اتفاق می‌افتد و اگر سیستم پیل سوختی قادر به تأمین ۵۰۰۰ وات باشد، میزان مصرف ارزش سوخت برابر $10^{-5} \times 12/21$ گرم بر ژول خواهد بود. تفکیک ۶ نقطه کارکردی پیل سوختی برحسب مقادیر کمیته، میانه و تقارن بین آن‌ها در شکل (۷) مشخص شده‌اند. این تفکیک با هدف پیشگیری از مشکلات افت عملکرد پیل سوختی و طول عمر پیل سوختی به ترتیب زیر انجام شده است:

- نقطه کاری اول: $P_{FC} = 0$
- نقطه کاری دوم: $P_{FC} = 1150 W$. ارزش سوخت مصرفی در این توان خروجی بیشینه است.
- نقطه کاری سوم: $P_{FC} = 1800 W$. تفاضل بین نقطه میانه و حد پایین انحراف معیار استاندارد منجر به انتخاب نقطه کاری سوم شده است.
- نقطه کاری چهارم: $P_{FC} = 3520 W$. ارزش سوخت هیدروژن در این توان خروجی برابر با مقدار میانه است.
- نقطه کاری پنجم: $P_{FC} = 4000 W$. ارزش سوخت هیدروژن در این توان خروجی برابر با مقدار متوسط است.
- نقطه کاری ششم: $P_{FC} = 5000 W$. پیل سوختی در حالی در حداکثر توان تولیدی فعالیت می‌کند که میزان مصرف هیدروژن در آن بیشترین مقدار را دارد. بازده در توان خروجی ۵۰۰۰ وات برابر ۴۰٪ است که کمترین مقدار را نسبت به سایر نقاط انتخابی دارد.



شکل (۷): تفکیک نقاط کارکردی PEMFC

میزان مصرف سوخت معادل به ظرفیت باتری، تغییرات SoC، بازده باتری و تجهیزات الکترونیک قدرت قرارگرفته در مسیر آن وابسته است. لذا فرمول نهایی میزان مصرف سوخت معادل به‌صورت رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود.



شکل (۹): محدوده بندی نواحی کارکردی باتری لیتیوم-یون

بنابراین، مدهای خروجی استراتژی پیشنهادی مطابق جدول (۴) تنظیم می شوند.

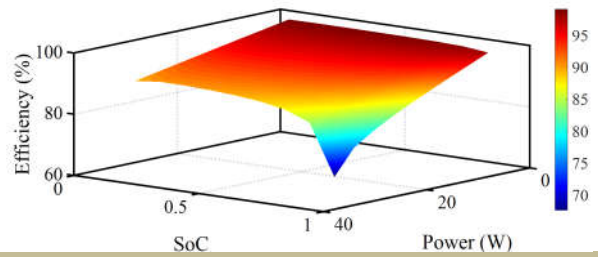
۴. نتایج شبیه سازی

محاسبه توان مورد تقاضای خودروی پیل سوختی و تغییرات آن، علاوه بر سرعت و شتاب به مشخصه های دینامیکی خودرو نیز وابسته است. مقادیر عددی مربوط به پارامترهای دینامیکی خودروی پیل سوختی در جدول (۵) ارائه شده است.

استراتژی مدیریت انرژی خودروی پیل سوختی نقش مهمی در بازده انرژی و کاهش مصرف سوخت دارد. در این پژوهش برای اعتبارسنجی روش مدیریت انرژی پیشنهادی، سیکل رانندگی LA92 به عنوان یک مسیر فرضی بر روی خودروی پیل سوختی اعمال شده است. سیکل رانندگی استاندارد LA92 از سیکل های معتبر و پرکاربرد در بررسی عملکرد وسایل نقلیه و میزان انتشار گازهای آلاینده هستند. در شبیه سازی تحت نرم افزار MATLAB، وضعیت شارژ اولیه باتری ۷۰٪ فرض شده است تا قابلیت مقایسه با نتایج سایر پژوهش ها فراهم باشد.

۴.۱. نتایج شبیه سازی سیکل رانندگی LA92

سیکل رانندگی استاندارد LA92 در شکل (۱۰) نشان داده شده و نتایج حاصل از شبیه سازی توان مورد نیاز خودروی پیل سوختی برای پیمایش آن در شکل های (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است. توان مورد نیاز خودروی پیل سوختی (P_{demand}) در شکل (۱۱) نمایش داده شده است که حداکثر توان مورد تقاضا در آن ۹/۹۸ kW می باشد. اختلاف وضعیت شارژ باتری اولیه و نهایی مطابق شکل (۱۳) برابر ۱/۳۳٪ است که میزان مصرف سوخت هیدروژن معادل آن ۱/۱۷ گرم می باشد. همچنین با توجه به میزان سوخت مصرفی از رابطه (۱۶) و شکل (۱۲)، میزان سوخت هیدروژن مصرفی برای پیمایش سیکل رانندگی LA92 برابر ۳۵/۴۷ گرم است. همچنین با توجه منحنی توان تولیدی پیل سوختی (شکل ۱۲) و تغییرات وضعیت شارژ باتری، میزان سوخت هیدروژن مصرفی کل برای پیمایش سیکل رانندگی LA92 در طی مدت زمان ۱۴۳۵ ثانیه برابر ۳۴/۳۰ گرم به دست آمده است.



شکل (۸): منحنی سه بعدی بازده ترکیبی باتری لیتیوم-یون

بازده ترکیبی باتری بیانگر محدوده قرارگیری بازده در SoC های مختلف است و می تواند در تفکیک نواحی مختلف کارکردی باتری تأثیرگذار باشد. امید ریاضی بازده ترکیبی ($E[BCE]$) به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$E[BCE] = \sum_{i=1}^n \eta_{BCE_i} \times P_B(\eta_{BCE_i}) = \mu_{BCE} \quad (27)$$

که در آن، η_{BCE_i} بازده ترکیبی باتری به ازای SoC های متفاوت و $P_B(\eta_{BCE_i})$ تابع توزیع احتمال بازده ترکیبی باتری است که به صورت توزیع یکنواخت در بازه $[0.1-0.9]$ تعریف شده است. μ_{BCE} مقدار میانه بازده ترکیبی باتری است، اما برای تحلیل نحوه پراکندگی بازده ترکیبی و محدوده بندی آن به شاخص های پراکندگی بیشتری نیاز است. انحراف معیار استاندارد یک شاخص پراکندگی مناسب است که میزان پراکندگی بازده را از نقطه میانگین مشخص می کند، انحراف معیار بازده ترکیبی از ریشه دوم واریانس مطابق رابطه (۲۸) محاسبه می شود که در آن σ_{BCE} انحراف معیار استاندارد بازده ترکیبی است.

$$\sigma_{BCE} = \sqrt{E[(BCE - \mu_{BCE})^2]} \quad (28)$$

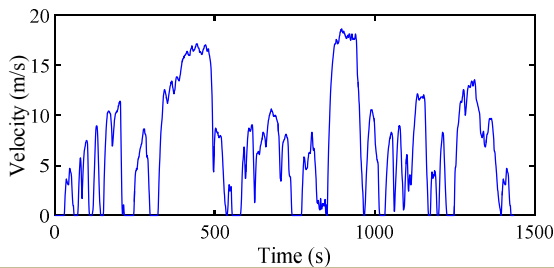
$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n (\eta_{BCE_i} - \mu_{BCE})^2 \times P_B(\eta_{BCE_i})}$$

بازده ترکیبی باتری، مقدار میانگین و انحراف معیار آن نسبت به SoC های مختلف به ازای توان نامی برای یک سلول باتری Li-ion در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می شود بیشینه بازده ترکیبی باتری ۸۸/۳۶٪ است که در وضعیت شارژ ۰/۲ اتفاق می افتد و کمترین مقدار بازده ترکیبی ۶۵/۳۲٪ است که در وضعیت شارژ ۰/۹ حاصل شده است. میانه بازده ترکیبی ۸۷/۰۹٪ و انحراف معیار آن ۷/۴۳٪ است که از داده های مذکور برای تعیین نواحی کارکردی باتری استفاده شده است. تفکیک ۴ ناحیه کارکردی باتری برحسب مقادیر حداکثر، میانه و انحراف معیار در شکل (۹) مشخص شده اند.

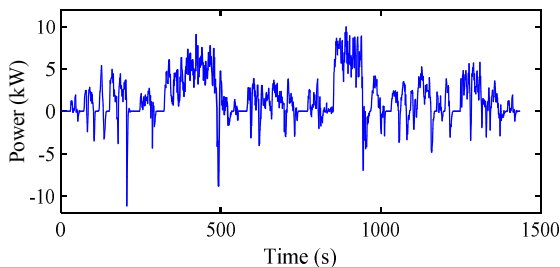
در نهایت، حالات مختلف حرکت خودرو و SoC باتری در استراتژی مدیریت انرژی به عنوان ورودی لحاظ شده اند و استراتژی پیشنهادی بر اساس تجزیه و تحلیل اطلاعات ورودی، مدهای عملکردی شش گانه را تعیین می کند.

جدول (۵): پارامترهای دینامیکی FCEV [۱۷]

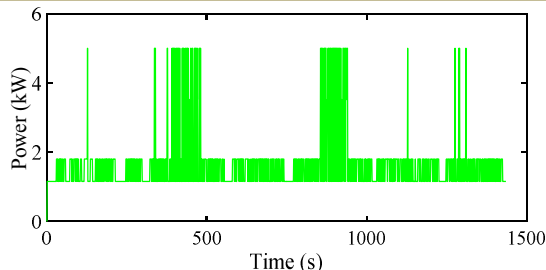
مشخصات	مقدار	واحد
وزن خودرو	۵۷۸	کیلوگرم
مساحت قسمت جلو	۲	متر مربع
ضریب درگ	۰/۷	-
ضریب غلطی	۰/۰۱۵	-
چگالی هوا	۱/۲۰۲	کیلوگرم بر متر مکعب



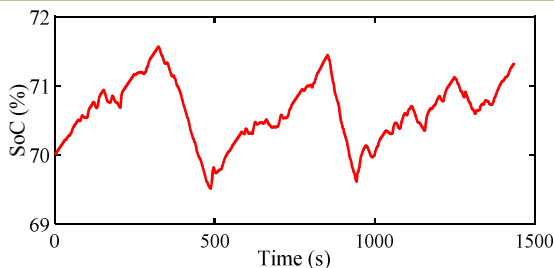
شکل (۱۰): سیکل رانندگی LA92



شکل (۱۱): توان مورد تقاضا در سیکل رانندگی LA92



شکل (۱۲): توان تولیدی در سیکل رانندگی LA92



شکل (۱۳): SoC باتری در سیکل رانندگی LA92

جدول (۴): مدهای کارکردی FCEV

وضعیت حرکت خودرو	محدوده باتری	وضعیت توان مورد تقاضا	مد عملکردی
توقف	ناحیه ۱	-	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۲	-	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۳	-	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۴	-	$P_{fc,Opt} = 0kW$
شتاب گیری	ناحیه ۱	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 4kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 3.52kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.8kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۱	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 5kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 5kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 5kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 3.52kW$
سرعت ثابت	ناحیه ۱	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 3.52kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.8kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۱	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 5kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 4kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 3.52kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
ترمز گیری	ناحیه ۱	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} < 5kW$	$P_{fc,Opt} = 0kW$
	ناحیه ۱	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 4kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 3.52kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} > 5kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
ترمز مولدی	ناحیه ۱	$P_{demand} < -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} < -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} < -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 0kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} < -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 0kW$
	ناحیه ۱	$P_{demand} > -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۲	$P_{demand} > -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۳	$P_{demand} > -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 1.15kW$
	ناحیه ۴	$P_{demand} > -2.4kW$	$P_{fc,Opt} = 0kW$

۲.۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با سایر روش‌های EMS

در این بخش، نتایج حاصل از مدیریت انرژی پیشنهادی برخط با استراتژی‌های PSVM-DS [۱۹] و کنترل منطق فازی بهینه‌شده توسط

روش تئوری شواهد تدریجی (Dempster-Shafer) برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل منطق فازی و از روش PSVM برای طبقه‌بندی الگوهای سیکل رانندگی برخط بهره برده است.

الگوریتم ژنتیک [۱۷] مقایسه شده است. میزان مصرف سوخت هیدروژن، مصرف هیدروژن معادل، وضعیت شارژ اولیه باتری و مقدار نهایی برای پیمایش سیکل رانندگی LA92 در جدول (۶) به ازای هر سه استراتژی درج شده است. روش PSVM-DS یک استراتژی است که از

جدول (۶): مقایسه استراتژی‌های مختلف مدیریت انرژی

استراتژی پیشنهادی	روش کنترل فازی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک [۱۷]	روش PSVM-DS [۱۹]	استراتژی‌های مدیریت انرژی
۰/۷	۰/۷	۰/۷	SoC اولیه
۰/۷۱۳۳	۰/۷	۰/۷۱۳۲	SoC نهایی
۳۵/۴۷	۴۹	۵۳	مصرف هیدروژن (گرم)
۳۴/۳۰	۴۹	۵۱/۸۵	مصرف هیدروژن معادل (گرم)

یابد. همچنین وضعیت شارژ باتری نیز در تعیین شرایط بهره‌برداری بهینه از پیل سوختی لحاظ شده است. علاوه بر آن، حالات دینامیکی مختلف خودرو نیز لحاظ شده‌اند و نقش مهمی در تعیین مدهای عملکردی شش‌گانه دارند.

نتایج حاصل از استراتژی پیشنهادی با نتایج روش‌های PSVM-DS و کنترل فازی (بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک) مقایسه شد. مشاهده شد که در استراتژی پیشنهادی، میزان مصرف هیدروژن معادل کمترین مقدار را در مقایسه با سایر روش‌ها دارد.

در این مقاله، شناسایی دقیق حالت‌های مختلف عملکردی خودرو، تفکیک وضعیت شارژ باتری بر مبنای بازده ترکیبی و محاسبات ریاضی، تعیین میزان ارزش هر گرم سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی، سطح‌بندی توان تولیدی پیل سوختی، استخراج سریع اطلاعات مورد نیاز و توزیع بهینه توان با در نظر گرفتن بازده سبب دستیابی به یک استراتژی نوین مدیریت انرژی برخط چندسطحی شده که منجر به کاهش مصرف سوخت هیدروژن معادل گردیده است.

در کارهای آتی، تأثیر افزودن منابع تغذیه جدیدی از قبیل ابرخازن یا فتوولتائیک بر روی عملکرد استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی نیز مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر مستخرج از رساله دکتری تخصصی است که بر اساس قرارداد ۹۷/۱۰۲ تحت حمایت شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان قرار گرفته است. نویسندگان مقاله از حمایت شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان سپاسگزاری می‌کنند.

با توجه به جدول (۶) مشاهده می‌شود میزان مصرف هیدروژن معادل در روش‌های کنترل منطق فازی بهینه شده و PSVM-DS به ترتیب برابر ۴۹ و ۵۳ گرم است. درحالی‌که در استراتژی پیشنهادی میزان مصرف هیدروژن معادل برابر ۳۴/۳۰ گرم است. لذا استراتژی پیشنهادی موفق به کاهش مصرف سوخت هیدروژن معادل شده است. همچنین وضعیت شارژ باتری نیز در محدوده قابل قبولی نگه داشته شده است. لذا برتری استراتژی پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر در جدول (۶) مشهود است.

۵. نتیجه‌گیری و بحث

در این مقاله، یک استراتژی نوین برای مدیریت انرژی برخط در خودروی پیل سوختی مجهز به باتری ارائه شده که قادر به کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده انرژی است. این استراتژی از مفاهیم کاهش مصرف سوخت معادل، تنظیم مدهای عملکردی مختلف و کنترل ماشین حالت بهره برده و حالت دینامیکی خودرو و وضعیت شارژ باتری را به‌عنوان پارامترهای ورودی اساسی در مدیریت انرژی خودروی پیل سوختی در نظر گرفته است. از این رو، استراتژی پیشنهادی می‌تواند در شرایط رانندگی برخط مورد استفاده قرار گیرد.

تعیین میزان ارزش هر گرم سوخت هیدروژن مصرفی در تولید انرژی الکتریکی، طبقه‌بندی حالات مختلف حرکت خودرو و تفکیک وضعیت شارژ باتری بر اساس محاسبات ریاضی و تجزیه و تحلیل نتایج آماری در این مطالعه پیشنهاد شده است تا استراتژی پیشنهادی قادر به افزایش بازده انرژی باشد.

در استراتژی پیشنهادی، بهره‌برداری از پیل سوختی در چهار نقطه با بازده محلی بهینه (به همراه نقاط ابتدایی و انتهایی) برنامه‌ریزی شده است تا علاوه بر مبحث بازده، مصرف سوخت هیدروژن نیز کاهش

مراجع

«بهبود بازده انرژی و ارزیابی اقتصادی موتورسیکلت الکتریکی با

[۱] فرهادی قریبه، حامد، صادقی یزدانخواه، احمد، عزیزیان، محمدرضا،

حضور موتور چهار فاز *AFPM* و ترکیب ابرخازن و باتری»، نشریه

مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۳۷-۲۴، ۱۳۹۲.

- [2] Xie, S., Hu, X., Zhang, Q., Lin, X., Mu, B. and Ji, H., "Aging-aware co-optimization of battery size, depth of discharge, and energy management for plug-in hybrid electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 450, pp. 227638, 2020.
- [3] Gharibeh, H.F., Khiavi, L.M., Farrokhifar, M., Alahyari, A. and Pozo, D., "Power Management of Electric Vehicle Equipped with Battery and Supercapacitor Considering Irregular Terrain", *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, pp. 1-5, Moscow, Russia, 2019.
- [4] Gharibeh, H.F., Yazdankhah, A.S., Azizian, M.R., Farrokhifar, M. and Alahyari, A., "Impact Assessment of Installed Photovoltaic on Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Considering Fast Identification of Power Changes", *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, pp. 1-6, Moscow, Russia, 2020.
- [۵] اجتهد، سید حسین، خوبی آرانی، سعید، حلوی نیاسر، ابوالفضل، حاجی‌زاده، امین، «مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با استفاده از کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۴۵-۳۴، ۱۳۹۵.
- [6] Mebarki, N., Rekioua, T., Mokrani, Z., Rekioua, D. and Bacha, S., "PEM fuel cell/battery storage system supplying electric vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 45, pp. 20993-21005, 2016.
- [7] Gharibeh, H.F., Yazdankhah, A.S. and Azizian, M.R., "Improved energy management for a power-split multi-source fuel cell vehicle based on optimal source sizing and regenerative braking", *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 1-6, Florence, Italy, 2016.
- [8] Das, H.S., Tan, C.W. and Yatim, A., "Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 268-291, 2017.
- [9] Song, Z., Li, J., Hou, J., Hofmann, H., Ouyang, M. and Du, J., "The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study", *Energy*, Vol. 154, pp. 433-441, 2018.
- [۱۰] الباسی، حسین، قریشی، مهناز، «ساختار کنترلی جدید برای مدیریت انرژی در خودروی برقی هیبرید پلاگین مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی»، مهندسی مدیریت انرژی، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۲۵-۱۴، ۱۳۹۸.
- [11] Fletcher, T., Thring, R. and Watkinson, M., "An Energy Management Strategy to concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle", *international journal of hydrogen energy*, Vol. 41, No. 46, pp. 21503-21515, 2016.
- [12] Sellali, M., Betka, A. and Djerdir, A., "Power management improvement of hybrid energy storage system based on H ∞ control", *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019.
- [13] Li, H., Ravey, A., N'Diaye, A. and Djerdir, A., "A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid

electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor", *Journal of Power Sources*, Vol. 395, pp. 262-270, 2018.

- [14] Huang, Y., Wang, H., Khajepour, A., Li, B., Ji, J., Zhao, K. and Hu, C., "A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 96, pp. 132-144, 2018.
- [15] Qiao, Y., Song, Y. and Huang, K., "A Novel Control Algorithm Design for Hybrid Electric Vehicles Considering Energy Consumption and Emission Performance", *Energies*, Vol. 12, No. 14, pp. 2698, 2019.
- [16] Feroldi, D. and Carignano, M., "Sizing for fuel cell/supercapacitor hybrid vehicles based on stochastic driving cycles", *Applied energy*, Vol. 183, pp. 645-658, 2016.
- [17] Ravey, A., Blunier, B. and Miraoui, A., "Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles: From offline to online and experimental results", *IEEE transactions on vehicular technology*, Vol. 61, No. 6, pp. 2452-2457, 2012.
- [18] Mokrani, Z., Rekioua, D., Mebarki, N., Rekioua, T. and Bacha, S., "Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 30, pp. 19556-19575, 2017.
- [19] Zhou, D., Al-Durra, A., Gao, F., Ravey, A., Matraji, I. and Simões, M.G., "Online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles based on data fusion approach", *Journal of Power Sources*, Vol. 366, pp. 278-291, 2017.
- [20] Muñoz, P.M., Correa, G., Gaudiano, M.E. and Fernández, D., "Energy management control design for fuel cell hybrid electric vehicles using neural networks", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 48, pp. 28932-28944, 2017.
- [21] Ahmadi, S., Bathaee, S., Hosseinpour, A.H., "Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy", *Energy Conversion and Management*, Vol. 160, pp. 74-84, 2018.
- [22] Geng, C., Jin, X. and Zhang, X., "Simulation research on a novel control strategy for fuel cell extended-range vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 408-420, 2019.
- [23] Wang, Y.-X., Ou, K. and Kim, Y.-B., "Modeling and experimental validation of hybrid proton exchange membrane fuel cell/battery system for power management control", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 35, pp. 11713-11721, 2015.
- [24] Zhao, H. and Burke, A.F., "Optimization of fuel cell system operating conditions for fuel cell vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 186, No. 2, pp. 408-416, 2009.
- [25] Eftekhari, A., "Low voltage anode materials for lithium-ion batteries", *Energy Storage Materials*, Vol. 7, pp. 157-180, 2017.
- [26] Wang, Y., Zhang, X., Liu, C., Pan, R. and Chen, Z., "Multi-timescale power and energy assessment of lithium-ion battery and supercapacitor hybrid system using extended Kalman filter", *Journal of Power Sources*, Vol. 389, pp. 93-105, 2018.
- [27] <https://www.horizonfuelcell.com/h-series-stacks>
- [28] Zhou, W., Yang, L., Cai, Y. and Ying, T., "Dynamic programming for new energy vehicles based on their work modes Part II: Fuel cell electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 407, pp. 92-104, 2018.