

بهینه‌سازی راهبرد مدیریت انرژی در خودروی هیبریدی (پیل‌سوختی، باتری و ابرخازن)

سامان احمدی^۱، سید محمد تقی بطحایی^{۲*}

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۳/۹/۴

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۴/۱۸

چکیده:

در خودروهای الکتریکی هیبریدی، ترکیب پیل‌سوختی با باتری و ابرخازن مزیت‌هایی مانند چگالی توان بالا، راهاندازی سریع و بهبود پاسخ دینامیکی مجموعه را به ارمغان خواهد آورد. در چنین ترکیبی، کیفیت عملکرد قوای محرکه به نحوه کنترل و توزیع توان بین منابع انرژی وابسته است. در این مقاله، با ارائه راهبردی هوشمند، مدیریت بهینه انرژی در منابع توان خودروی هیبرید پیل‌سوختی موردن بررسی قرار می‌گیرد. برای این ترکیب، راهبرد مدیریت انرژی بر مبنای منطق فازی مدل‌سازی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شده است. نتایج این مطالعه تایید می‌کند که راهبرد این مقاله، در میزان صرف‌جویی سوخت، حفظ وضعیت شارژ منع تغذیه، بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش کارایی منابع توان اثر قابل توجهی دارد.

کلمات کلیدی:

الگوریتم ژنتیک، پیل‌سوختی، خودروی الکتریکی هیبریدی، راهبرد مدیریت انرژی، کنترل منطق فازی

Saman-Ahmadi@live.com
Bathaee@kntu.ac.ir

(۱) کارشناس ارشد مهندسی مکاترونیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول)
(۲) دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

مقدمه

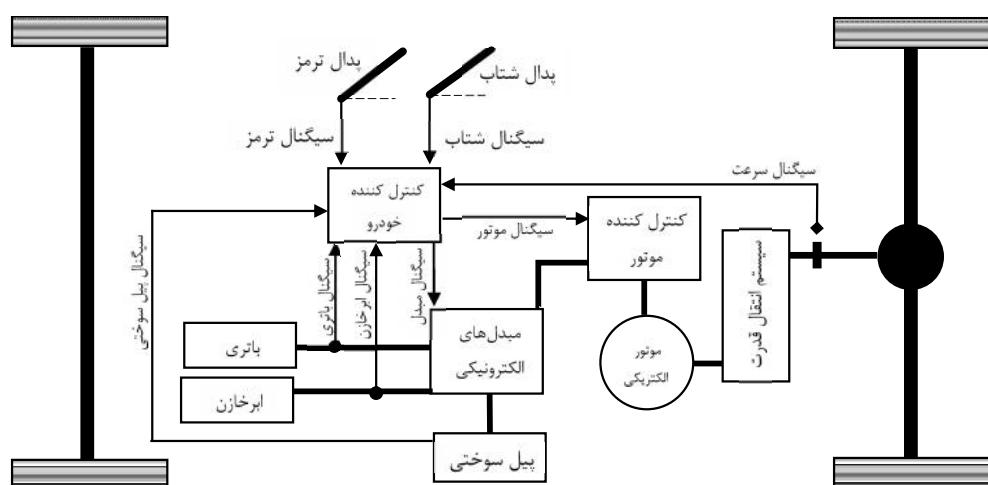
خودروهای هیبرید پیل سوختی، خودروهای الکتریکی هیبریدی را با فناوری پیل سوختی تجهیز می‌کند. این خودروها عموماً از باتری و/یا ابرخازن در ساختار منابع توان خود بهره می‌برند. عموماً در ساختارهای ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی، طراحی سیستم مدیریت انرژی که سهم توان سیستم پیل سوختی و منابع انرژی کمکی را مشخص کند، فن مهمی است.

دربیکی از جدیدترین مطالعات توسط محققین اسپانیایی [۶]، پنج راهبرد کنترلی به منظور استفاده در خودروی هیبرید پیل سوختی / باتری / ابرخازن ارائه شده است. این راهبردها شامل کنترل حالت عملکردی بر اساس وضعیت شارژ باتری، کنترل با استفاده از حلقه‌های تعادلی شارژ، کنترل بر مبنای کمینه‌سازی مصرف معادل هیدروژن، کنترل منطق فازی و کنترل پیش‌بین هستند. در پژوهش دیگری توسط کائوکس و همکارانش در فرانسه [۳]، سیستم بهینه‌شده فازی به منظور مدیریت لحظه‌ای و برخط انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی / ابرخازن ارائه گردیده است. امیر پورصمد و مرتضی منتظری [۱۰]، با ارائه یک راهبرد فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک، به بررسی عملکرد آن در دو چرخه رانندگی و همچنین انجام آزمون‌های شبیه‌سازی و شتاب‌گیری پرداخته‌اند. این بررسی روی خودروی هیبرید موازی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که راهبرد مذکور نقش مؤثری در کاهش مصرف سوخت، بهبود عملکرد خودرو و کاهش آلایندگی‌ها داشته است. از فعالیت‌های داخلی درز مینه مدیریت انرژی خودروهای هیبرید می‌توان به پایان‌نامه دکترای آقای انصاری موحد [۱] اشاره کرد. در این پژوهش به مسئله مدیریت بهینه انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی با رویکرد مبتنی بر مدل پرداخته شده است. خودرو در یک چرخه حرکتی از پیش معلوم حرکت می‌کند و تابع هدف دارای مؤلفه‌های مصرف سوخت، پایداری وضعیت شارژ و غیره است. با شبیه‌سازی مسئله در چند چرخه حرکتی استاندارد، میزان مصرف سوخت خودرو در دو ترکیب شامل پیل سوختی / باتری و پیل سوختی / ابرخازن مقایسه شده است و نتایج آن حکایت از بهبود مصرف سوخت در حضور ابرخازن دارد.

با نگاهی گذرا به تحقیقات انجامشده در حوزه راهبردهای کنترلی خودروی هیبرید پیل سوختی می‌توان دریافت که اکثر راهبردهای کنترلی، تعادل مناسبی بین مصرف سوخت، وضعیت شارژ منابع تغذیه، کارایی عملکرد منابع توان و کیفیت پاسخ دینامیکی در نظر نگرفته‌اند. علاوه بر این، از آنجایی که عموماً الگوی رانندگی در خودروها پیش‌بینی نشدنی است، راهبردهای ارائه‌شده می‌بایست علاوه بر کار در نقاط بهینه عملکردی، در تمام چرخه‌های رانندگی به صورت برخط قابل استفاده باشند. این مقاله سعی دارد تا با ارائه راهبردی کارآمد، در راستای تحقق مجموعه اهداف فوق تحقیقات مفیدی انجام دهد. بدین منظور در بخش بعد، پیکربندی خودروی هیبرید معرفی شده و اجزای اصلی آن طراحی خواهند شد. در ادامه، ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی معرفی شده و راهبردهای مدیریت انرژی طراحی و مدل‌سازی می‌شوند. درنهایت، این راهبردها بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل بررسی خواهند شد.

پیکربندی خودروی هیبرید پیل سوختی

قوای محرکه خودروی هیبرید پیل سوختی عموماً ساختاری مانند شکل (۱) دارد. این ساختار شامل سیستم پیل سوختی، منابع توان ثانویه، ماشین الکتریکی، کنترل کننده مرکزی، مبدل‌های الکترونیک قدرت و حسگرهای اندازه‌گیری است.



شکل (۱) پیکربندی قوای محرکه خودروی هیبرید پیل سوختی نمونه [۴]

توان کاری ماشین الکتریکی

توان بیشینه ماشین الکتریکی معمولاً توسط شتاب، سرعت بیشینه و عملکرد شبیه‌پیمایی تعیین می‌شود. توان ماشین الکتریکی با در نظر گرفتن همه عوامل توسط رابطه (۱) به پارامترهای خودرو مرتبط می‌شود [۱۲, ۱۳].

$$P_m = \frac{V}{y_t} \left(0.015mg \cos(\theta) + \frac{1}{2} C_D A V^2 + mg \sin(\theta) + m \frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

در جایی که θ بازده سیستم انتقال قدرت و C_D ضریب جرمی عناصر دورانی در خودرو است. برای خودرویی با مشخصات جدول (۱)، توان ماشین الکتریکی در وضعیت‌های حرکتی مختلف در جدول (۲) آورده شده است. طبق اطلاعات جدول (۲)، توان موردنیاز برای شتاب‌گیری خودرو بسیار بیشتر از توان موردنیاز برای راندن خودرو در سرعت ثابت است. این نتایج بیان می‌کند که اندازه ماشین الکتریکی توسط عملکرد شتاب‌گیری محدود می‌شود. بنابراین، ماشین الکتریکی با حداقل توان ۷۳ کیلووات به عنوان محرکه خودروی نوعی با مشخصات جدول (۱) انتخاب می‌شود.

جدول ۱) مشخصات خودروی نوعی [۸]

پارامتر	m(kg)	(kg.m ⁻³)	C _D	A(m ²)	g(m.s ⁻²)	t(%)
مقدار	1500	1.202	0.335	2	9.81	1.043

جدول ۲) توان موردنیاز برای ماشین الکتریکی

نوع حرکت	توان ماشین الکتریکی
شتاگری از ۰ تا ۱۰۰ کیلومتربرساعت طی ۱۲ ثانیه در جاده با شیب ۵٪	72.44 kW
شتاگری از ۰ تا ۱۰۰ کیلومتربرساعت طی ۱۲ ثانیه در جاده بدون شیب	60.56 kW
حرکت با سرعت ۱۵۰ کیلومتربرساعت در جاده بدون شیب	44.46 kW
حرکت با سرعت ۱۰۰ کیلومتربرساعت در جاده با شیب ۵٪	40.72 kW

توان سیستم پیلسوختی

سیستم پیلسوختی می‌بایست توان مناسبی را برای غلبه بر شیب ملائم در سرعت خاص و بدون کمک گرفتن از منابع ثانویه فراهم کند. برای خودروی نوعی با اطلاعات جدول (۱) و (۲) و با در نظر گرفتن بازده ماشین الکتریکی، سیستم پیلسوختی با توانی حدود ۵۰ کیلووات برای فراهم آوردن شرایط رانندگی موردنظر نیاز است.

توان منابع تغذیه ثانویه

توان کاری منابع تغذیه ثانویه بر اساس توان بیشینه ماشین الکتریکی در شتابگیری و توان نامی سیستم پیلسوختی، طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$P_{PS} = \frac{P_m}{y_m} - P_{fc} \quad (2)$$

درجایی که P_{PS} توان نامی منبع تغذیه ثانویه، P_m توان بیشینه ماشین الکتریکی، P_{fc} توان نامی سیستم پیلسوختی و y_m بازده ماشین الکتریکی است. با در نظر گرفتن m برابر ۸۵٪، توان منبع تغذیه ثانویه طبق رابطه (۲) حدوداً معادل ۳۸ کیلووات است. اگر کل این توان توسط باتری تامین شود، تعداد باتری‌های موردنیاز طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳].

$$n_{bat} = \frac{P_{PS}}{m_{module} P_s y_b} \quad (3)$$

درجایی که بازده باتری، P_s توان ویژه باتری و وزن m_{module} هر باتری بر حسب کیلوگرم است. جدول (۳) مشخصات توان و انرژی ویژه برای باتری و ابرخازن را نشان می‌دهد [۱۱]. طبق اطلاعات جدول (۳) و رابطه (۳)، حداقل ۲۱ باتری برای تامین توان مکمل قوای محركه در طول رانندگی نیاز است.

جدول (۳) مشخصات منابع تغذیه

نوع منبع تغذیه	توان ویژه ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	انرژی ویژه ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$)	بازده (%)	وزن (kg)
باتری (سرپ اسیدی)	180	28	90	11
ابرخازن	2300	3.2	~100	0.7

ظرفیت انرژی منابع تغذیه

منابع تغذیه، انرژی مکمل موردنیاز قوای محركه را از طریق دشارژ تامین کرده و توسط جذب انرژی از بازتولید ترمزی یا سیستم پیل‌سوختی قادر به ذخیره انرژی هستند. میزان انرژی ذخیره شده در این منابع توسط رابطه (۴) بیان می‌شود [۴].

$$E = \int_t (P_{PS\text{-charge}} - P_{PS\text{-discharge}}) dt \quad (4)$$

درجایی که $P_{PS\text{-discharge}}$ و $P_{PS\text{-charge}}$ به ترتیب توان شارژ و دشارژ منابع تغذیه هستند. با فرض تامین توان راهاندازی خودرو توسط باتری، توان مکمل در وضعیت شتاب‌گیری توسط ابرخازن فراهم می‌شود. برای تامین توان ۳۸ کیلوواتی در مدت ۱۲ ثانیه، به ۱۲۶/۶ وات ساعت انرژی نیاز است. ظرفیت انرژی خازنی موردنیاز طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۴].

$$C_E = \frac{\Delta E_{max}}{C_p} \quad (5)$$

درجایی که C_E ظرفیت انرژی کل و C_p درصدی از کل ظرفیت انرژی مجاز برای استفاده است. اگر حداقل افت ولتاژ پایانه ابرخازن ۲۰٪ در نظر گرفته شود، مقدار C_p برای ابرخازن حدود ۳۶٪ است [۵]. بنابراین، ظرفیت کل انرژی خازنی حدود ۳۵۱/۶ وات ساعت بوده و طبق انرژی ویژه ابرخازن و رابطه (۶)، حدود ۱۵۵ ابرخازن نیاز خواهد بود.

$$n_{UC} = \frac{C_p}{m_{module} E_s} \quad (6)$$

با توجه به محاسبات فوق، مشخصات عمومی خودروی هیبرید پیل‌سوختی برای شبیه‌سازی در بخش‌های بعدی مطالعه در جدول (۴) دیده می‌شود.

جدول ۴) مشخصات خودروی هیبرید پیل سوختی

وزن بدن و بار خودرو (کیلوگرم)	۷۲۸	فاصله دو محور خودرو (متر)	۲/۶
نوع سیستم پیل سوختی	پلیمری	توان بیشینه سیستم پیل سوختی (کیلووات)	۵۰
وزن سیستم پیل سوختی (کیلوگرم)	۲۲۳	حداکثر بازده سیستم پیل سوختی (%)	۶۰
ظرفیت بیشینه باتری(آپرساعت)	۲۵	ولتاژ نامی باتری (ولت)	۱۲
وزن هر باتری (کیلوگرم)	۱۱	تعداد باتری	۲۵
نوع ماشین الکتریکی	القایی AC	توان بیشینه ماشین الکتریکی (کیلووات)	۷۵
وزن ماشین الکتریکی (کیلوگرم)	۹۱	حداکثر بازده ماشین الکتریکی (%)	۹۲
ظرفیت بیشینه ابرخازن (فرااد)	۲۵۰۰	حداکثر ولتاژ ابرخازن (ولت)	۲/۵
وزن هر خازن (کیلوگرم)	۰/۷۱	تعداد خازن‌ها	۱۵۵

مدل‌سازی و شبیه‌سازی با^۱ ADVISOR

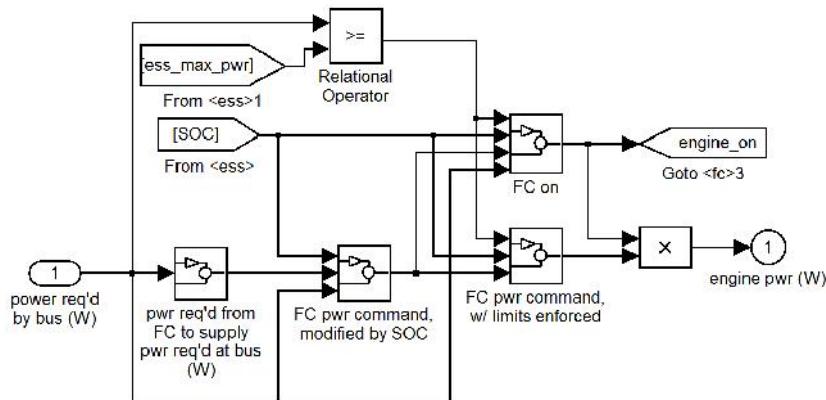
شبیه‌ساز ADVISOR، یک ابزار و تحلیل سیستمی به منظور مدل‌سازی خودروهای پیشرفته است. در محیط سیمولینک متلب^۲ ایجاد شده است. این ابزار اصولاً برای مشخص کردن میزان صرفه‌جویی در سوخت، آلایندگی‌ها و کارایی خودروهایی به کار برده می‌شود که از فناوری‌هایی چون پیل سوختی، باتری، ابرخازن و موتور الکتریکی در پیکربندی هیبرید استفاده می‌کند [۷]. در این شبیه‌ساز، کاربر می‌تواند مدل‌های عناصر موجود را با مدل‌های پیچیده‌تر و حتی مدل‌های ابداعی خود جایگزین کند. آزمون‌های معتبر برای بررسی عملکرد خودروها در این شبیه‌ساز شامل تحلیل چرخه رانندگی، شبیه‌سازی و شتاب‌گیری هستند.

راهبرد مدیریت انرژی شبیه‌ساز برای ترکیب پیل سوختی و باتری

شبیه‌ساز ADVISOR از زیرسیستم‌های متنوعی در بلوك راهبرد کنترلی خود برای خودروی هیبرید پیل سوختی باتری بهره می‌برد. زیرسیستم‌های این بلوك در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. زیرسیستمی که میزان توان پیل سوختی را با توجه به وضعیت شارژ منبع تعذیه تعیین می‌کند، نقش مهمی در محاسبات سیستم مدیریت انرژی دارد. این زیرسیستم، که با نام "FC pwr command, modified by SOC" قابل مشاهده است، توان مشخصی به توان درخواستی قوای محرکه اضافه می‌کند. این توان موجب حفظ وضعیت شارژ منبع تعذیه در محدوده مجاز به واسطه شارژ یا دشارژ می‌شود.

1) Advanced Vehicle Simulator

2) MATLAB Simulink



شکل ۲) مدل راهبرد انرژی مورداستفاده در شبیه‌ساز

طبق رابطه (۷)، میزان توان اضافه شده به اختلاف سطح شارژ فعلی و سطح شارژ مورد انتظار بستگی دارد.

$$P_{batt} = \frac{SOC^* - SOC}{0.5(SOC_{high} - SOC_{low})} P_{char} \quad (7)$$

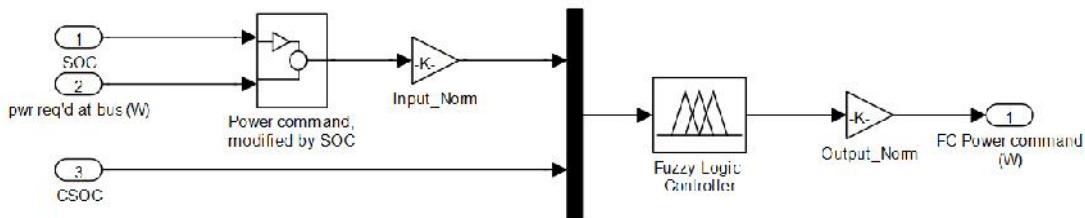
درجایی که P_{char} میزان توان حداکثری برای تنظیم وضعیت شارژ و SOC^* سطح شارژ مطلوب طبق رابطه (۸) است.

$$SOC^* = 0.5(SOC_{high} + SOC_{low}) \quad (8)$$

زمانی که وضعیت شارژ باتری به حد پایینی خود یا SOC_{low} برسد، توان اضافی P_{char} به توان درخواستی از سیستم پیل‌سوختی اضافه می‌شود. در این وضعیت، منبع تغذیه ثانویه توسط این توان اضافی شارژ خواهد شد. مقادیری که شبیه‌ساز برای حدود بالا و پایین شارژ در نظر گرفته است، به ترتیب برابر $0/8$ و $0/4$ است [۸].

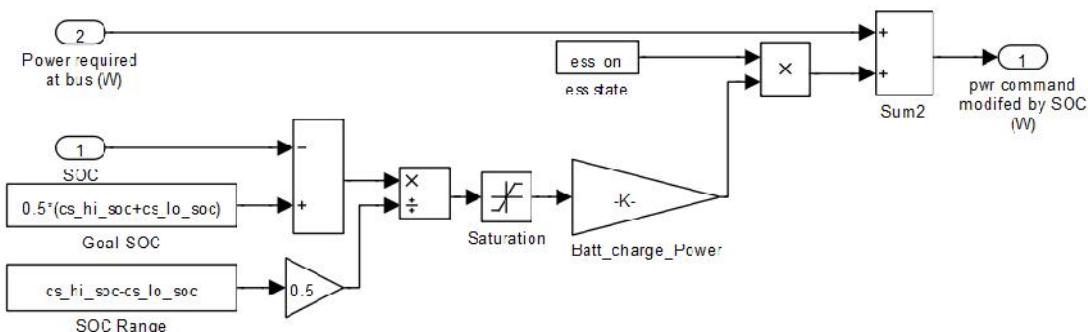
راهبرد مدیریت انرژی برای ترکیب پیل‌سوختی، باقی و ابرخازن

راهبردهای مدیریت انرژی که بر مبنای توان درخواستی و وضعیت شارژ منابع تغذیه کار می‌کنند، می‌توانند توسط روش کنترل فازی به نحو مؤثری توسعه داده شوند. سیستم‌های فازی یک فرایند سامانمند برای تبدیل پایگاه دانش به یک نگاشت غیرخطی فراهم می‌سازد. اساس منطق فازی ساده و قابل فهم است و قواعد به زبان انسانی بیان می‌شود. کنترل کننده منطق فازی راهبردی منعطف و برخط است و اجباری برای کنترل نمونه ریاضی سیستم ندارد. علاوه بر این، پارامترهای کنترل کننده منطق فازی، قابلیت بهینه‌سازی با ابزارهای متناسب را داراست [۲]. شما کلی مدل کنترل کننده فازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳) مدل کنترل منطق فازی در خودروی پیل سوختی/باتری/ابرخازن

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، کنترل منطق فازی در این راهبرد بر اساس توان درخواستی و وضعیت شارژ ابرخازن، میزان توان پیل سوختی را مشخص می‌کند. آنچه این راهبرد را از راهبردهای دیگر متمایز می‌کند، لحاظ شدن توان شارژ/دشارژ باتری در توان درخواستی است که در شکل (۴) به تصویر درآمده است.



شکل ۴) مدل اضافه شدن توان باتری به توان درخواستی

در اینجا نیز وضعیت شارژ مطلوب، میانگین دو حد بالا و پایین وضعیت شارژ است. به منظور کاهش نوسانات باتری و استفاده حداکثری از ظرفیت ابرخازن، حد بالا و پایین شارژ در این راهبرد به ترتیب برابر $75/65/0$ هستند. لحاظ می‌شود. پس از مشخص شدن توان پیل سوختی، توان ابرخازن و باتری نیز مشخص می‌شود. اگر توان پیل سوختی برای تامین مجموع توان درخواستی کافی نباشد، ابرخازن مابقی توان را تأمین می‌کند. اگر توان قابل ارائه ابرخازن نیز کافی نباشد، باتری می‌تواند در نقش مکمل آنها ظاهر شود. قابل ذکر است که با توجه به دینامیک پیل سوختی، نرخ تغییرات توان پیل سوختی با تغییرات توان درخواستی برابر نیست. با این وجود، زمان راهاندازی اولیه و نرخ تغییرات توان خروجی پیل سوختی به طور کامل در مدل آن لحاظ شده است. رابطه (۹) تعادل توان در این مجموعه را بیان می‌کند.

$$P_{comm} = P_{FC} + P_{Batt} + P_{UC} \quad (9)$$

در کاربری خودرو، ابرخازن‌ها به عنوان یک ذخیره‌ساز پیشرفته به منظور تامین ماشین الکتریکی، مخصوصاً در شتاب‌گیری و شبیه‌پیمایی به کاربرده می‌شوند و در بازیافت انرژی ترمیزی نیز بسیار کارآمد هستند. ابرخازن جزء عناصری

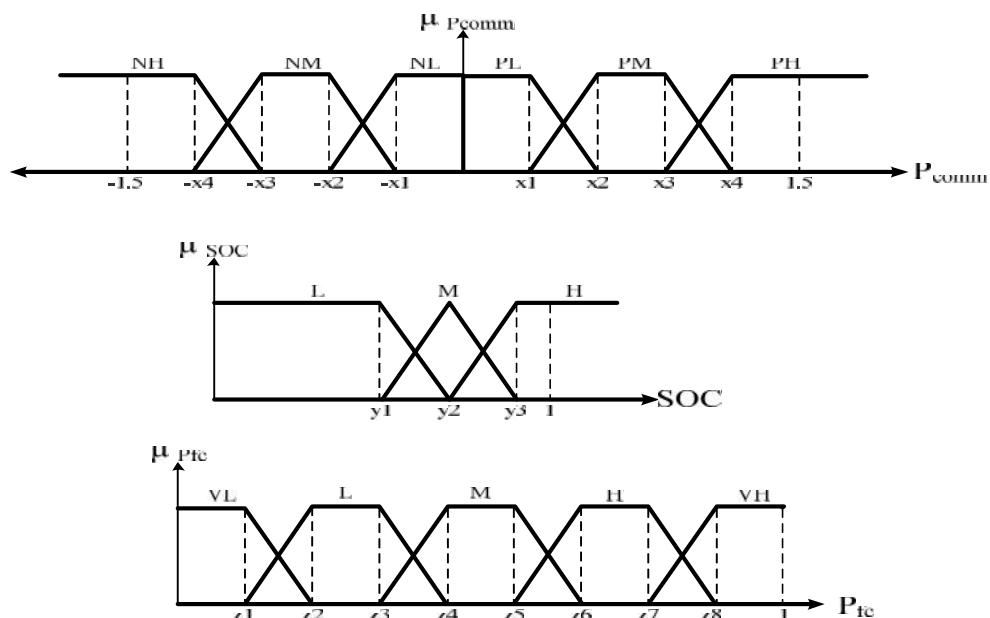
است که توان و بیژه بالایی نسبت به سایر منابع از جمله پیل سوختی و باتری ارائه می‌کند. علاوه بر چگالی توان بالا، طول عمر و بازده ابرخازن در چرخه‌های شارژ و دشارژ بمراتب از باتری‌ها بیشتر است. بازده متوسط هریک از عناصر توان مشخصه‌ای از نحوه عملکرد آنها است. قابل ذکر است که در این مطالعه افت عملکرد بلندمدت عناصر بررسی نمی‌شود.

طراحی راهبرد کنترل منطق فازی

مجموعه قواعد فازی در نظر گرفته شده برای این کنترل کننده در جدول (۵) آورده شده است. شکل (۵) شمای کلی توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده را به همراه متغیرهای زبانی ارائه شده در جدول (۶) نشان می‌دهد. سیستم کنترل فازی استفاده شده در این مقاله متشکل از موتور استنتاج ممدازی، فازی ساز تکین و غیر فازی ساز مرکز ثقل است. مقادیر اولیه طراحی شده برای پارامترهای توابع عضویت در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۵) مجموعه قواعد سیستم کنترل کننده منطق فازی

		P_{comm}					
		NH	NM	NL	PL	PM	PH
SOC	L	VL	L	M	H	VH	VH
	M	VL	VL	L	M	H	VH
	H	VL	VL	VL	L	M	H



شکل ۵) توابع عضویت کنترل کننده منطق فازی

جدول ۶) پارامترهای توابع عضویت فازی

پارامتر	x _۱	x _۲	x _۳	x _۴		y _۱	y _۲	y _۳
مقدار	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱		۰/۵	۰/۶	۰/۶۵
پارامتر	z _۱	z _۲	z _۳	z _۴	z _۵	z _۶	z _۷	z _۸
مقدار	۰/۱	۰/۱۷۵	۰/۳۲۵	۰/۴	۰/۵۵	۰/۶۲۵	۰/۷۷۵	۰/۸۵

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

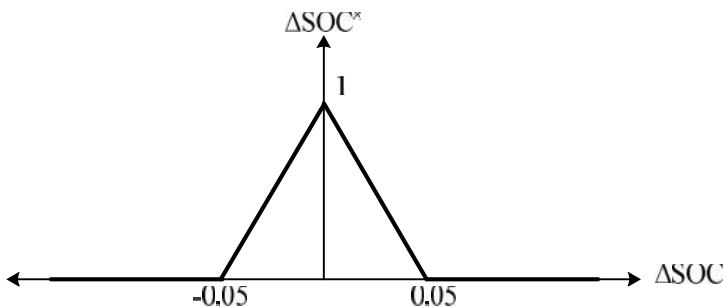
یکی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی توابعی است که عموماً به صورت تجربی تنظیم می‌شوند. این الگوریتم توانایی انجام بهینه‌سازی با متغیرهای گستته و پیوسته را دارد و برخلاف سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند شبکه عصبی، نیازی به اطلاعات مبتنی بر مشتق ندارد. قابلیت عبور از کمینه‌های محلی و ارائه فهرستی از متغیرهای بهینه از دیگر مزایای استفاده از این الگوریتم است. در این مطالعه، اهداف بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی مصرف انرژی معادل سوخت خودرو، افزایش راندمان متوسط پیل‌سوختی / باتری و حفظ وضعیت شارژ باتری در طول چرخه رانندگی است. پارامترهای معرفی کننده این اهداف به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند.تابع هدف تعریف شده به منظور تحقق اهداف فوق که به ازای هر کروموزوم ارزیابی می‌شود، طبق رابطه (۱۰) است:

$$Fitness = w_1 MPGGe^* + w_2 MPG^* + w_3 eff_{FC} + w_4 eff_{batt} + w_5 \Delta SOC^* \quad (10)$$

متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مواردی است که در ادامه معرفی می‌شوند. در رابطه (۱۰)، MPGGe^۱ معرف میزان پیمایش بر حسب مایل، به ازای انرژی معادل یک گالن بنزین است. MPG^۲ میزان پیمایش بر حسب انرژی یک گالن از سوخت است. علامت (*) در کنار این کمیت‌ها نشان از هنجار شدن آنها توسط مقادیر بیشینه است. eff_{FC} متوسط راندمان پیل‌سوختی و eff_{batt} متوسط راندمان باتری است. SOC^{*} نیز میزان ارزش داده شده برای وضعیت شارژ نهایی است که طبق شکل (۶) محاسبه می‌گردد.

1) Miles Per Gallon Gasoline equivalent

2) Miles Per Gallon



شکل ۶) تعیین میزان برازندگی وضعیت شارژ نهایی با توری

مقادیری که به منظور هنجار سازی کمیت‌های MPG و $MPGGe$ استفاده می‌شوند، پس از تعیین چرخه‌های رانندگی مبنای محاسبه خواهند شد. چرخه رانندگی مبنای تجمعی از رانندگی شهری (FTP) و بزرگراه ($HWFET$ ^۱) است. در این مطالعه، طی یک سفر برون‌شهری، ابتدا خودرو در شرایط اولیه سرد مسافتی را درون شهر طی کرده و پس از آن با شرایط محیطی گرم وارد بزرگراه می‌شود. وضعیت شارژ باتری در طول این سفر پیوسته است. از آنجایی که شبیه‌ساز عملاً دو چرخه حرکتی مجزا را می‌پیماید، به ازای هر یک از چرخه‌ها مقادیر متفاوتی برای کمیت‌ها تولید می‌کند. برای محاسبه مقادیر مرجع کمیت‌های پیمایشی که در هنجار سازی MPG و $MPGGe$ مورد نیاز هستند، از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$MPGGe = \frac{1}{\frac{0.55}{MPGGe_{FTP-Cold}} + \frac{0.45}{MPGGe_{HWFET-Hot}}} \quad (11)$$

با فرض اینکه راهبرد پیش‌فرض شبیه‌ساز، مقدار مشخصی برای کمیت‌های ترکیبی فوق محاسبه می‌کند، آن مقدار برای هنجار کردن کمیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. راندمان متوسط پیل‌سوختی و باتری نیز در هردو چرخه رانندگی میانگین‌گیری شده و وضعیت شارژ نیز در چرخه‌ها جمع خواهد شد. علاوه بر این، به منظور سنجش توانایی راهبردها در آزمون‌های شبیه‌پیمایی و شتاب‌گیری، محدودیت‌هایی به تابع برازش اضافه می‌شود. این محدودیت‌ها عموماً به صورت قیدی از توابع جریمه در تابع برازش لحاظ می‌شوند. فرم کلی این توابع به صورت رابطه (۱۲) است.

$$Fitness = \sum_{n=1}^N w_n f_n - \sum_{i=1}^p S_i g_i^2(x) \quad (12)$$

در جایی که $f(x)$ تابع برازش بوده و $g_i(x)$ مجموعه قیود نامساوی است. پارامتر S_i به صورت رابطه (۱۳) تعیین می‌گردد.

1) Federal Test Procedure

2) Highway Fuel Economy Test

$$_i = \begin{cases} 0 & g_i(x) \leq 0 \\ ... > 0 & g_i(x) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

محدودیت‌هایی که در ارزیابی تابع برازش در نظر گرفته می‌شوند، به صورت خلاصه در جدول (۷) آورده شده‌اند. جدول (۸) نیز پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی راهبردهای مدیریت انرژی را نشان می‌دهد. انتخاب کروموزوم‌ها برای جفت‌گیری، بر اساس روش چرخ رولت انجام می‌گیرد. روش تولیدمُث نیز ترکیبی از جابجایی و درونیابی پارامترهای است. از آنجایی که الگوریتم ژنتیک پیوسته ذاتاً سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک دودویی عمل می‌کند، در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک پیوسته برای بهینه‌سازی استفاده شده است. علاوه بر این، وجود جمعیت بزرگی از راه حل‌ها، باعث قدرتمند شدن الگوریتم ژنتیک می‌شود، اما از طرفی، همین عامل، سرعت اجرای الگوریتم ژنتیک را بشدت کاهش می‌دهد.

جدول (۷) محدودیت‌های آزمون‌های عملکردی

محدودیت	مقدار	تلورانس
شتاپ‌گیری از ۰ تا ۹۷ کیلومتربر ساعت (s)	۱۲>	۰/۰۴
شتاپ‌گیری از ۶۴ تا ۹۷ کیلومتربر ساعت (s)	۵/۳>	۰/۰۴
شتاپ‌گیری از ۰ تا ۱۳۷ کیلومتربر ساعت (s)	۲۳/۴>	۰/۰۴
شتاپ بیشینه ($m.s^{-2}$)	۵/۳<	۰/۴
سرعت بیشینه ($Km.h^{-1}$)	۱۴۵<	۰/۴
مسافت طی شده در پنج ثانیه (m)	۴۲/۷<	۰/۴
شیب‌پیمایی (%)	۶/۵<	۰/۴

جدول (۸) پارامترهای الگوریتم ژنتیک

اندازه جمعیت	نرخ انتخاب	نرخ جهش	تعداد تکرار
۱۲	۰/۵	۰/۱	۸۰

کنترل بهینه‌شده منطق فازی

الگوریتم ژنتیک می‌تواند برای بهینه‌سازی پایگاه داده کنترل منطق فازی مورداستفاده قرار گیرد [۹]. با در نظر گرفتن توابع عضویت کامل و سازگار، علاوه بر پوشش کل فضای حالت، تعداد متغیر کمتری برای توصیف توابع عضویت موردنیاز است. در این مطالعه، کروموزوم‌ها طبق شکل (۷) شامل آرایش خاصی از پارامترهای خروجی کنترل کننده فازی هستند.

Z ₁	Z ₂ -Z ₁	...	Z ₈ -Z ₇
----------------	--------------------------------	-----	--------------------------------

شکل (۷) ساختار کروموزوم پارامترهای توابع عضویت

پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک توسط کد نویسی در محیط متلب صورت گرفته است. از آنجایی که در الگوریتم ژنتیک پیوسته از مولد طبیعی استفاده می‌شود، ممکن است مقادیر بدست آمده از یک بیشتر شود. در این حالت، با هنجار سازی آنها را اصلاح می‌کنیم. مقادیر بهینه پارامترهای توابع عضویت در جدول (۹) آورده شده است.

جدول (۹) پارامترهای بهینه‌شده تابع عضویت خروجی فازی

پارامتر	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈
مقدار	۰	۰/۰۸	۰/۲۱	۰/۴	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۹۱	۱

نتایج شبیه‌سازی و بررسی

جدول (۱۰) نتایج شبیه‌سازی راهبردهای منتخب را در آزمون‌های شب و شتاب نشان می‌دهد. قابل ذکر است که وضعیت اولیه شارژ در راهبردها ۰/۰۷ است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، ADV-PTC معرف راهبرد کنترلی پیش‌فرض در شبیه‌ساز است. Opt-FLC نیز راهبرد بهینه‌شده منطق فازی توسط الگوریتم ژنتیک است.

جدول (۱۰) نتایج آزمون‌های عملکردی

پارامتر	Opt-FLC	ADV-PTC
شتاب گیری از ۰ تا ۹۷ کیلومتر بر ساعت (s)	۸/۲	۱۱/۱
شتاب گیری از ۹۷ تا ۶۴ کیلومتر بر ساعت (s)	۳/۳	۰/۱
شتاب گیری از ۰ تا ۱۳۷ کیلومتر بر ساعت (s)	۱۱/۹	۲۲
شتاب بیشینه ($m.s^{-2}$)	۵	۴/۹۴
سرعت بیشینه ($km.h^{-1}$)	۱۵۷/۱	۱۵۷
مسافت طی شده در پنج ثانیه (m)	۵۹/۵	۵۱/۶
شبیه‌سازی (%)	۵/۷	۹

با توجه به جدول (۱۰)، نتایج حاصل از عملکرد دینامیکی راهبرد بهینه‌شده منطق فازی برای خودروی هیبرید پیل‌سوختی / باتری / ابرخازن در محدوده مجاز بوده و در آزمون شتاب بسیار بهتر از راهبرد دیگر عمل کرده است. به‌منظور بررسی چگونگی عملکرد راهبرد بهینه‌شده کنترل منطق فازی در خودروی هیبرید پیل‌سوختی، راهبردها در چهار چرخه رانندگی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. چرخه UDDS^۱ شامل ۲۳ دقیقه رانندگی شهری (شرایط سرد)، NYCC^۲ شامل ۱۰ دقیقه رانندگی شهری (شرایط سرد)، HWFET^۳ شامل ۱۳ دقیقه رانندگی (شرایط سرد) در بزرگراه و FTP شامل ۴۱ دقیقه رانندگی شهری (شرایط سرد و گرم) است. نتایج این ارزیابی در جدول (۱۱) به‌طور کامل آورده شده است.

1) Urban Dynamometer Driving Schedule
2) New York City Cycle

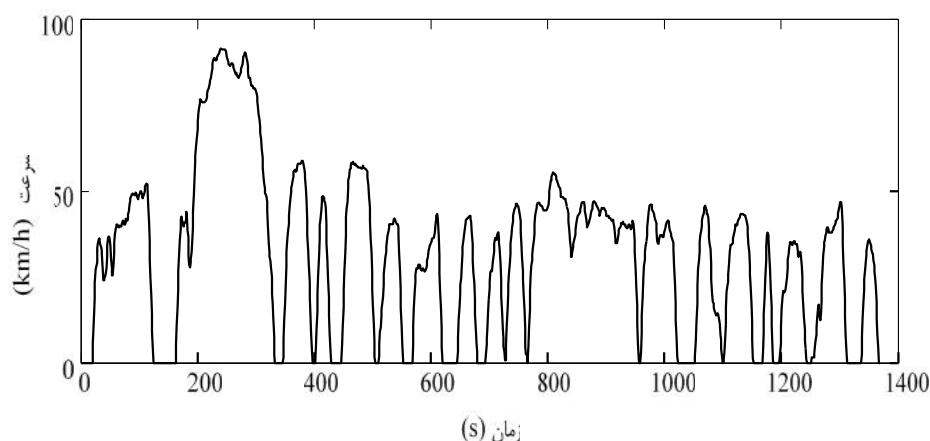
جدول ۱۱) نتیجه شبیه‌سازی راهبردهای کنترلی در چرخه‌های مختلف

	چرخه رانندگی	راهبرد کنترلی	MPG	MPGGe	SOC (%)	eff_{FC} (%)	eff_{Batt} (%)
<i>UDDS</i>	<i>Opt-FLC</i>	۴/۰۰	۵۹/۰۹	-۰/۱۳	۵۲/۸۹	۸۴/۸۹	
	<i>ADV-PTC</i>	۲/۱۲	۴۶/۱۴	۹/۰۴	۵۲/۳۵	۸۴/۲۴	
<i>NYCC</i>	<i>Opt-FLC</i>	۱/۸۳	۲۷/۰۸	-۰/۰۲	۵۲/۶۵	۸۵/۳۲	
	<i>ADV-PTC</i>	۱/۲۳	۱۸/۱۰	۶/۰۰	۴۹/۸۸	۸۳/۶۵	
<i>HWFET</i>	<i>Opt-FLC</i>	۴/۶۶	۶۸/۸۳	۰/۰۲	۵۴/۸۵	۸۲/۸۱	
	<i>ADV-PTC</i>	۵/۵۵	۸۲/۰۰	-۲/۶۴	۵۳/۶۲	۸۲/۴۸	
<i>FTP</i>	<i>Opt-FLC</i>	۴/۲۵	۶۲/۷۴	۰/۰۸	۵۴/۴۱	۸۵/۰۵	
	<i>ADV-PTC</i>	۲/۴۵	۵۱/۰۲	۸/۹۸	۵۲/۹۱	۸۲/۸۶	

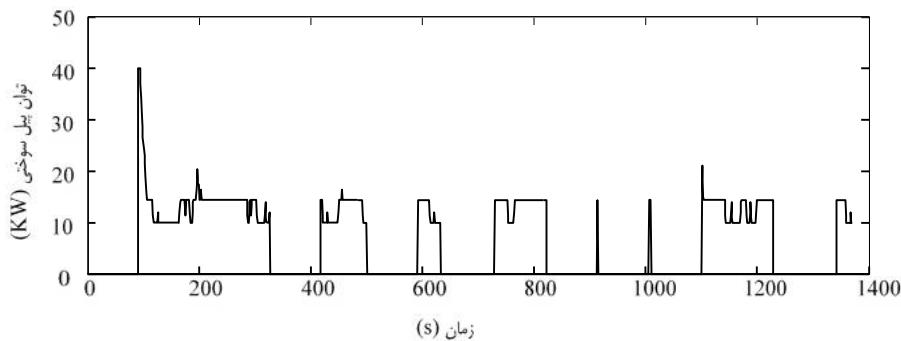
از نظر کیفیت پیمایش چرخه‌های رانندگی، نتایج بهتر با اعداد برجسته در جدول (۱۱) به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، راهبرد بهینه فازی عموماً بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده و اندازه اختلاف وضعیت شارژ نهایی باتری در چرخه‌های رانندگی این راهبرد کمتر از ۲ درصد است. به عبارت دیگر، رابطه (۱۴) در این راهبرد برقرار است.

$$|\Delta SOC| < 2\% \quad (14)$$

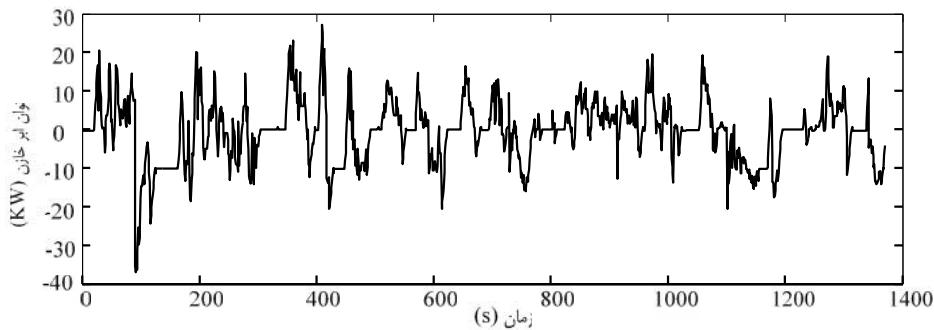
به منظور بررسی بیشتر نحوه عملکرد این راهبرد، چرخه رانندگی UDDS برای ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم انتخاب شده است. مشخصه سرعت-زمان این چرخه رانندگی در شکل (۸) دیده می‌شود. مشخصه‌های توان-زمان هر یک از منابع انرژی نیز طی چرخه مورد نظر برای راهبرد بهینه شده منطق فازی در شکل‌های (۹) تا (۱۱) آورده شده است.



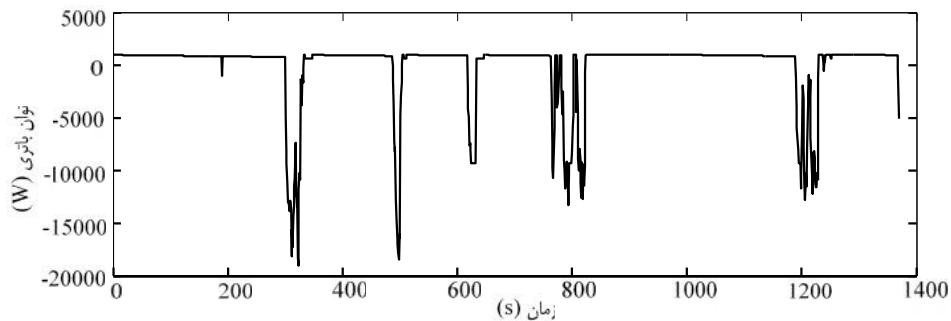
شکل ۸) مشخصه سرعت-زمان چرخه رانندگی UDDS



شکل ۹) توان پیل سوختی در راهبرد بهینه شده کنترل منطق فازی طی چرخه رانندگی



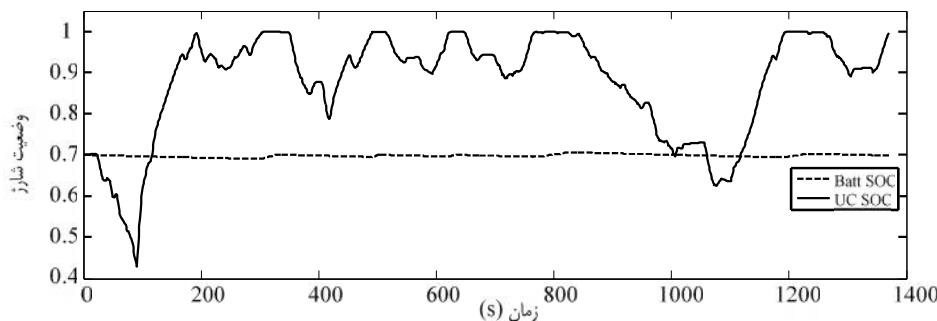
شکل ۱۰) توان ابرخازن در راهبرد بهینه شده کنترل منطق فازی طی چرخه رانندگی



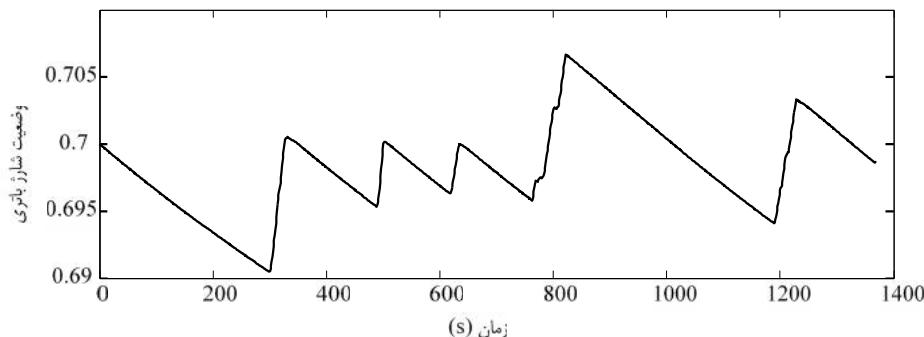
شکل ۱۱) توان باتری در راهبرد بهینه شده منطق فازی طی چرخه رانندگی

با کمی دقت در شکل های (۹) تا (۱۱) مشخص می شود که راهبرد بهینه شده فازی عملکرد مناسبی در مدیریت انرژی بین منابع تولید توان از خود نشان داده است. همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، سیستم پیل سوختی عموماً نزدیک به توان بهینه کار کرده و در موقعیت دیگر، به تناسب نیاز چرخه رانندگی بدون بار شده است. علاوه بر این، سیستم پیل سوختی به دلیل زمان بر بودن فرایند راه اندازی، توانی در ابتدای چرخه رانندگی ارائه نمی کند. طبق شکل (۱۰)، ابرخازن با دینامیک سریع خود، بخش عمده ای از تغییرات لحظه ای توان را به خود اختصاص داده است. از شکل (۱۱) چنین دریافت می شود که باتری در راهبرد بهینه فازی تغییرات توانی کمتری را متحمل می شود. علاوه بر این، با استفاده از ابرخازن، محدوده توانی

مورداستفاده باتری کاهش یافته است که این می‌تواند در کاهش هزینه‌های ظرفیت باتری نقش بسزایی داشته باشد. به منظور بررسی چگونگی رفتار وضعیت شارژ باتری و ابرخازن در راهبرد فازی، مشخصه‌هایی از این پارامتر در طول چرخه رانندگی UDDS آورده شده است. شکل (۱۲) نشان‌دهنده وضعیت شارژ باتری و ابرخازن در راهبرد بهینه فازی طی چرخه رانندگی مذکور است. به منظور بررسی دقیق رفتار وضعیت شارژ باتری در راهبرد بهینه شده فازی، نمایی بازشده تغییرات این پارامتر طی چرخه رانندگی در شکل (۱۳) آورده شده است.



شکل (۱۲) وضعیت شارژ باتری و ابرخازن در راهبرد بهینه منطق فازی طی چرخه رانندگی



شکل (۱۳) وضعیت شارژ باتری در راهبرد بهینه منطق فازی طی چرخه رانندگی

طبق شکل (۱۲)، نرخ تغییرات وضعیت شارژ باتری بسیار کم بوده و وضعیت شارژ ابرخازن در طول چرخه تغییرات گسترده‌ای دارد. علاوه بر این، از شکل (۱۳) می‌توان دریافت که راهبرد بهینه منطق فازی، محدوده کمتری از وضعیت شارژ باتری را در برگرفته و چرخه‌های منظمی از فرایند شارژ و دشارژ را طی می‌کند. این رفتار در افزایش طول عمر باتری بسیار اثرگذار است. علاوه بر این، بازه تغییرات وضعیت شارژ باتری در راهبرد بهینه فازی کمتر از ۲ درصد است.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه از اهمیت بهینه‌سازی در طراحی راهبردهای مدیریت انرژی حکایت دارد. چرخه‌های

رانندگی عملکرد خودرو در مسافت و زمان پیمایشی بالا و آزمون‌های شب و شتاب عملکرد خودرو در زمان و مسافت کوتاه را ارزیابی می‌کنند. راهبرد بهینه‌شده کنترل منطق فازی در چرخه‌های رانندگی متعدد عملکرد قابل قبولی را از نظر میزان مصرف سوخت، بازده منابع توان و حفظ وضعیت شارژ منبع تعذیه ارائه می‌دهد. در بیشتر چرخه‌های رانندگی، میزان پیمایش (به ازای مصرف معادل یک گالن از سوخت) با استفاده از راهبرد بهینه فازی بیشتر است. بازده متوسط پیل‌سوختی در چرخه‌های رانندگی نزدیک به بازده بهینه بوده و اختلاف وضعیت شارژ نهایی و ابتدایی با تری در این راهبرد کمتر از دو درصد است. عملکرد مناسب راهبرد فازی موجب بکارگیری پیل‌سوختی در توان‌های نزدیک به توان نامی می‌گردد. با حفظ وضعیت شارژ خودرو در طول چرخه رانندگی، نیازی به شارژ با تری از منابع خارج از خودرو وجود نخواهد داشت. علاوه بر این، استفاده از ابرخازن تاثیر بسزایی در تحقق اهداف بهینه‌سازی و افزایش طول عمر با تری دارد؛ زیرا استفاده از ابرخازن به عنوان منبع تعذیه ثانویه موجب کاهش بار توانی با تری شده و از شارژ/دشارژ مکرر آن جلوگیری می‌کند. استفاده از با تری در بازده بالا و شارژ/دشارژ در دوره‌های منظم، موجب افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های نگهداری آن می‌گردد.

منابع

- [۱] انصاری موحد، سید محمدمهدي. (۱۳۹۱)، کنترل بهینه مدیریت انرژی در خودرو پیل‌سوختی هیبرید، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تهران.
- [۲] وانگ، لی. (۱۳۸۸)، تشنلوب، محمد. صفارپور، نیما. افیونی، داریوش. سیستم‌های فازی و کنترل فازی، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.
- [۳] Caux, S., and et al., “On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems”, *International Journal of hydrogen energy*, Vol. 35, No. 5, pp. 2134-2143, 2010.
- [۴] Ehsani, M., Y. Gao, and Emadi, A., (2009) *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC press, pp.459-469.
- [۵] Gao, Y., and Ehsani, M., (2001) “Systematic design of fuel cell powered hybrid vehicle drive train” *Electric Machines and Drives Conference*, pp. 604-611.
- [۶] García, P., and et al., “Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 12, pp. 4791–4804, 2013.
- [۷] Kim, M., and et al., “Fuzzy control based engine sizing optimization for a fuel cell/battery hybrid mini-bus”, *Journal of power sources*, Vol. 178, No. 2, pp. 706-710, 2008.
- [۸] Li, Q., and et al., “Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 514-525, 2012.
- [۹] Li, X., and et al., “Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system”, *Journal of Power Sources*, Vol. 191, No. 2, pp. 542-549, 2009.
- [۱۰] Poursamad, A., and Montazeri, M., “Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles”, *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 7, pp. 861-873, 2008.

- [11] Ryu, J., Park, Y., and Sunwoo M., "Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition", *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 17, pp. 5735-5748, 2010.
- [12] Solano Martínez, J., and et al., "A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles", *Information Sciences*, Vol. 190, pp. 192-207, 2012.
- [13] Solano Martínez, J., and et al., "Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26, No. 7, pp. 1772-1779, 2013.