

مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای بهینه‌ی مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی

سامان احمدی^{۱*}، محمدتقی بطحایی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷	در سال‌های اخیر، کاربردهای متنوع پیل‌های سوختی توجهات زیادی را در محیط‌های صنعتی و دانشگاهی جهان به خود جلب کرده‌اند. ترکیب پیل سوختی با منابع تغذیه ثانویه مانند باتری، مزیت‌هایی مانند چگالی توان بالا، راه‌اندازی سریع و بهبود پاسخ دینامیکی را به ارمان خواهد آورد. در چنین ترکیبی، کیفیت عملکرد قوای محرکه به نحوه‌ی کنترل و توزیع توان بین منابع انرژی وابسته است. در این مقاله تلاش بر آن است تا با ارائه‌ی راهبردهای پیشرفته و هوشمند، مدیریت بهینه‌ی انرژی در منابع توان خودروی هیبرید پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته و تا حد امکان بهبود داده شود. این بررسی شامل ترکیب پیل سوختی و باتری است. برای این ترکیب، دو راهبرد مدیریت انرژی به تفکیک مدل‌سازی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شده است. این راهبردها شامل کنترل منطق فازی و کنترل حالت عملکردی است. هردو روش توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده و در محیط شبیه‌ساز خودروهای پیشرفته (ADVISOR) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی طی چندین چرخه‌ی رانندگی و آزمون‌های عملکردی در ترکیب پیل سوختی/باتری، حاکی از برتری راهبردهای بهینه‌سازی شده نسبت به راهبردهای بهینه‌سازی نشده و حتی روش موجود در شبیه‌ساز است. نتایج این مطالعه تایید می‌کند که راهبردهای این مقاله، در میزان صرفه‌جویی سوخت، حفظ سطح قوای منبع تغذیه، بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش کارایی منابع توان اثر قابل توجهی دارند.
واژگان کلیدی: الگوریتم ژنتیک، کنترل منطق فازی، کنترل حالت عملکردی، راهبرد مدیریت انرژی، خودروی هیبرید پیل سوختی	

۱- مقدمه

احتراقی از منابع عمده‌ی آلودگی هوا به شمار می‌روند، تمرکز بر گسترش وسایل نقلیه‌ای که از منابع تجدیدپذیر استفاده کرده و آلودگی کمتری به محیط‌زیست تحمیل

امروزه خودروها در سراسر جهان به‌عنوان اصلی‌ترین عامل حمل‌ونقل شناخته می‌شوند. از آنجایی که خودروهای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Saman-Ahmadi@Live.com

۱. فارغ‌التحصیل مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

می‌کنند، در دستور کار بیشتر کشورهای جهان قرار گرفته است.

خودروهای هیبریدی^۱، خودروهایی هستند که از دو یا چند منبع توان در سیستم حرکتی خود استفاده می‌کنند. در زمینه‌ی هیبریدسازی خودروها می‌توان از انواع باتری‌ها، ابرخازن‌ها و پیل‌های سوختی استفاده کرد. پیل‌سوختی به‌عنوان یک فناوری امیدبخش، به‌طور گسترده باهدف افزایش توان خروجی، کاهش هزینه و افزایش طول عمر تحت مطالعه است. در خودروهای هیبرید پیل‌سوختی معمولاً ترکیب پیل‌سوختی/باتری در ساختار منابع توان در نظر گرفته می‌شود. خودروهای هیبرید پیل‌سوختی، نسل بعدی خودروهای الکتریکی هیبریدی هستند که آینده‌ی درخشانی برای حضور گسترده در بازار پیش‌رو دارند.

از دیدگاه راهبرد کنترلی، سیستم هیبرید یک رویداد گسسته با دینامیک پیوسته است. دو هدف اساسی که می‌بایست در این راهبردها مدنظر قرار گرفته شود، بهینه‌سازی مصرف سوخت و بهبود عملکرد رانندگی است. عموماً در ساختارهای ترکیبی مبتنی بر پیل‌سوختی، طراحی یک سیستم مدیریت انرژی که سهم توان سیستم پیل‌سوختی و منابع انرژی کمکی را مشخص کند، فن مهمی است.

در سال‌های اخیر، روش‌های کنترلی متنوعی به‌منظور مدیریت انرژی در خودروهای هیبریدی طراحی و استفاده شده است. در یکی از جدیدترین مطالعات توسط لیانفنگ ژو و همکارانش [۱]، کنترل‌کننده‌ای چندحالتی و بر-خط^۲ با هدف بهبود عملکرد پیل‌سوختی در خودرو طراحی شده است. مطالعه دیگری توسط دیما فارز و همکارانش [۲]، از بهینه‌سازی بر-خط توسط کنترل‌کننده‌های PID به‌منظور کاهش مصرف سوخت هیدروژن در خودروی پیل‌سوختی استفاده شده است. طبق مطالعه دیگری توسط پابلو گارسیا و همکارانش [۳]، پنج روش کنترلی به‌منظور استفاده در خودروی هیبریدی متشکل از پیل‌سوختی، باتری و ابرخازن ارائه شده است. راهبردهای کنترلی شبیه‌سازی شده در این

مقاله شامل کنترل حالت‌های عملکردی بر اساس سطح قوای باتری، کنترل با استفاده از حلقه‌های تعادلی در توان مصرفی باتری، کنترل بر مبنای کمینه‌سازی مصرف معادل هیدروژن، کنترل منطق فازی و کنترل پیش‌بین هستند. در مطالعه‌ی دیگری توسط سولانو مارتینز و همکارانش [۴]، به طراحی نوع خاصی از کنترل‌کننده‌ی فازی بر اساس تجربیات ۱۰ نفر از افراد متخصص در زمینه‌ی خودروهای الکتریکی هیبریدی پرداخته شده است. در این روش، سیستم فازی توسط ضرابی از عدم قطعیت ترکیب و توسعه داده شده است. پژوهشی دیگر توسط کاوکس و همکارانش [۵]، سیستم بهینه‌شده‌ی فازی به‌منظور مدیریت لحظه‌ای و بر-خط انرژی در خودروی هیبریدی متشکل از پیل‌سوختی و ابرخازن ارائه کرده است. در این مطالعه سعی شده است تا با بهینه‌سازی توابع عضویت سیستم فازی توسط الگوریتم ژنتیک، میزان مصرف هیدروژن و خطای لحظه‌ای توان کمینه گردد. در این مطالعه از دو چرخه‌ی رانندگی جهت مقایسه‌ی استفاده شده است.

با نگاهی گذرا به تحقیقات انجام‌شده در حوزه‌ی روش‌های کنترل خودروی هیبرید پیل‌سوختی، می‌توان دریافت که اکثر آنها تعادل مناسبی بین مصرف سوخت، سطح قوای منابع تغذیه، کارایی منابع توان و کیفیت پاسخ دینامیکی در نظر نگرفته‌اند. علاوه بر این، از آنجایی که عموماً الگوی رانندگی در خودروها غیرقابل پیش‌بینی است، راهبردهای ارائه‌شده می‌بایست علاوه بر کار در نقاط بهینه‌ی عملکردی، در تمام چرخه‌های رانندگی به‌صورت بر-خط قابل‌استفاده باشند. بدین منظور نیاز است تا راهبردهای ارائه شده، در بیش از یک چرخه‌ی رانندگی مورد ارزیابی قرار گیرند و علاوه بر مصرف سوخت، عوامل موثر بر عملکرد خودرو نیز در بهینه‌سازی لحاظ شوند.

در این مقاله سعی بر آن است تا با ارائه‌ی راهبردهای کارآمد، در راستای تحقق مجموعه اهداف فوق تحقیقات مفیدی انجام شود. بدین منظور، در بخش بعد پیکربندی

^۱ Hybrid Vehicles

^۲ On-line

عوامل توسط رابطه (۱) به پارامترهای خودرو مرتبط می‌شود [۷ و ۸].

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

که η_t بازدهی سیستم انتقال قدرت و δ ضریب جرمی عناصر دورانی در خودرو است. برای خودرویی با مشخصات جدول ۱، توان ماشین الکتریکی طی وضعیت‌های عملکردی متفاوت در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، توان موردنیاز برای شتاب‌گیری خودرو بسیار بیشتر از توان موردنیاز برای راندن خودرو در سرعت ثابت است. این نتایج تأکید می‌کند که اندازه‌ی ماشین الکتریکی توسط عملکرد شتاب‌گیری محدود می‌شود؛ بنابراین، ماشین الکتریکی با حداقل توان ۷۳ کیلووات به‌عنوان محرکه‌ی خودروی نوعی با مشخصات جدول ۱ انتخاب می‌شود.

جدول ۱- مشخصات خودروی نوعی

پارامتر	$m(\text{kg})$	$\rho(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_D
مقدار	1500	1.202	0.335
پارامتر	$A(\text{m}^2)$	$g(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	δ
مقدار	2	9.81	1.043

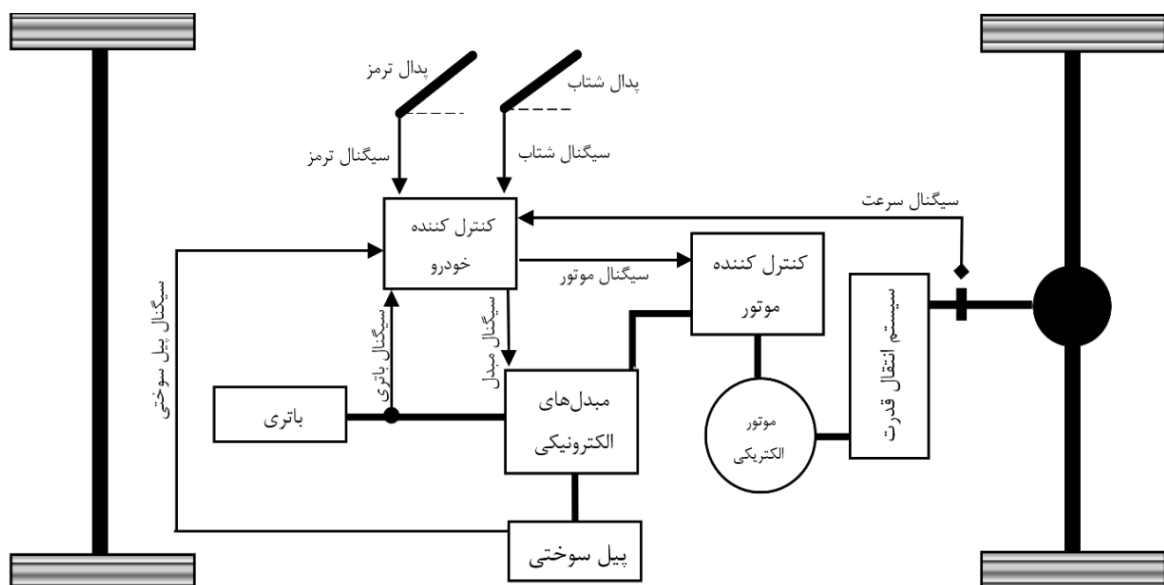
خودروی هیبرید پیل‌سوختی معرفی شده و اجزای اصلی آن طراحی خواهند شد. در بخش سوم، ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی معرفی می‌شود و در بخش چهارم، راهبردهای مدیریت انرژی طراحی و مدل‌سازی می‌شوند. در نهایت این روش‌ها در بخش پنجم بهینه‌سازی و شبیه‌سازی خواهند شد.

۲- پیکربندی خودروی هیبرید پیل‌سوختی

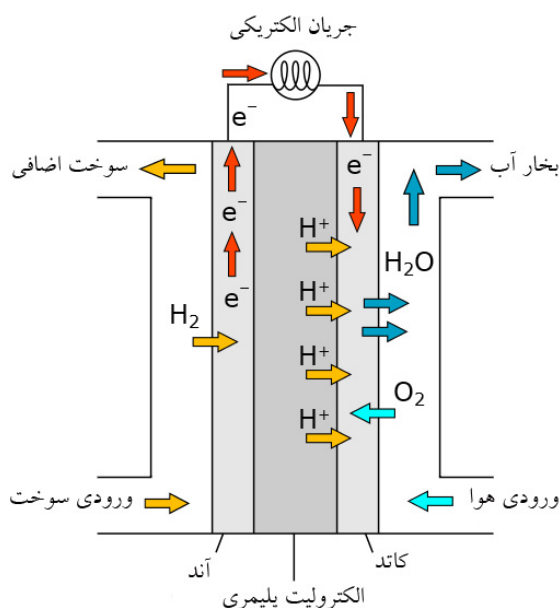
سیستم‌های محرکه‌ی الکتریکی، قلب خودروهای هیبریدی و الکتریکی هستند. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص پیکربندی خودروهای هیبرید پیل‌سوختی صورت گرفته است. این ساختار اساساً شامل سیستم پیل‌سوختی به‌عنوان منبع توان اصلی، منبع توان ثانویه مانند باتری، ماشین الکتریکی، کنترل‌کننده‌ی مرکزی خودرو، مبدل‌های الکترونیک قدرت و حسگرهای اندازه‌گیری است. قوای محرکه این خودرو عموماً ساختاری مطابق شکل ۱ دارد.

۲-۱- توان کاری ماشین الکتریکی

توان بیشینه‌ی ماشین الکتریکی معمولاً توسط شتاب، سرعت بیشینه و عملکرد شیب‌پیمایی در خودرو تعیین می‌شود. توان ماشین الکتریکی با در نظر گرفتن همه‌ی



شکل ۱- پیکربندی قوای محرکه‌ی خودروی هیبرید پیل‌سوختی نمونه [۶]



شکل ۲- ایجاد جریان در یک سلول سوختی پلیمری [۹]

۲-۳- توان منبع تغذیه ثانویه

باتری‌ها به دلیل هزینه‌ی پایین، قابلیت حمل و استحکام بالای خود، از رایج‌ترین منابع تغذیه در بازار هستند. مزایای استفاده از باتری‌ها در خودروهای مبتنی بر پیل سوختی شامل موارد زیر است:

- راه‌اندازی سریع خودروهای هیبرید پیل سوختی
 - قابلیت پیمایش با باتری در مواقع اتمام سوخت
 - پاسخ سریع در برابر تغییرات لحظه‌ای بار
- توان کاری منابع تغذیه ثانویه بر اساس توان بیشینه‌ی ماشین الکتریکی در شتاب‌گیری و توان کاری سیستم پیل سوختی، طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود [۷].

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

در رابطه‌ی فوق، P_{PS} توان نامی منبع تغذیه ثانویه، P_m توان بیشینه‌ی ماشین الکتریکی، P_{fc} توان کاری سیستم پیل سوختی و η_m بازدهی ماشین الکتریکی است. با در نظر گرفتن بازدهی متوسط ۸۵ درصدی برای ماشین الکتریکی، توان منبع تغذیه ثانویه طبق رابطه‌ی ۲ حدوداً معادل ۳۸ کیلووات است. اگر کل این توان توسط باتری تامین شود، تعداد باتری‌های مورد نیاز طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه خواهد شد [۱۰].

جدول ۲- توان مورد نیاز برای ماشین الکتریکی

توان ماشین الکتریکی	نوع حرکت
72.44 kW	شتاب‌گیری از ۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت طی ۱۲ ثانیه در جاده‌ی با شیب ۵٪
60.56 kW	شتاب‌گیری از ۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت طی ۱۲ ثانیه در جاده‌ی بدون شیب
44.46 kW	حرکت با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت در جاده‌ی بدون شیب
40.72 kW	حرکت با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در جاده‌ی با شیب ۵٪

۲-۲- توان سیستم پیل سوختی

یک سیستم کامل پیل سوختی، مجموعه‌ای از سلول‌هایی است که با ورود هیدروژن و اکسیژن هوا به داخل آن‌ها، پس از فعل و انفعالات شیمیایی تولید انرژی نموده و توان تنظیم نشده‌ای در خروجی تحویل می‌دهد. شکل ۲ نحوه‌ی تولید جریان الکتریکی در یک سلول پیل سوختی را نشان می‌دهد. سلول‌های پیل سوختی به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند تا ولتاژ خروجی مطلوب حاصل شود. جریان پیل سوختی، متناسب با مساحت فعال هر سلول است. ابعاد و تعداد سلول‌ها، معیارهای مناسبی از مشخصه‌ی توانی پیل سوختی هستند.

سیستم پیل سوختی می‌بایست قابلیت تامین توان کافی برای خودرو در سرعت‌های ثابت و زیاد را داشته باشد. علاوه بر این، سیستم پیل سوختی می‌بایست توان مناسبی برای غلبه بر شیب ملایم در سرعتی خاص را بدون کمک گرفتن از منبع تغذیه فراهم کند. برای خودروی نوعی با مشخصات جدول ۱، همان‌طور که در جدول ۲ مشخص شده است، توان الکتریکی به مقدار ۴۴ کیلووات برای تامین قدرت مورد نیاز طی حرکت یکنواخت در جاده‌ی مسطح و شیب‌دار کافی است. با در نظر گرفتن بازدهی قوای محرکه، سیستم پیل سوختی با توانی حدود ۵۰ کیلووات برای فراهم آوردن شرایط رانندگی طولانی مورد نیاز خواهد بود.

۳-۱- راهبرد مدیریت انرژی در شبیه‌ساز

شبیه‌ساز ADVISOR از زیرسیستم‌های کاربردی متنوعی در بلوک راهبرد کنترلی خود برای خودروی هیبرید پیل سوختی بهره می‌برد. زیرسیستم‌های این بلوک در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در این شکل، زیرسیستمی که میزان توان پیل سوختی را با توجه به سطح قوای منبع تغذیه تعیین می‌کند، نقش مهمی در محاسبات سیستم مدیریت انرژی دارد. این زیرسیستم، به منظور حفظ سطح قوای منبع تغذیه در محدوده‌ی مجاز، توان مشخصی به توان درخواستی قوای محرکه اضافه می‌کند.

در این راهبرد، میزان توان اضافه‌شده به اختلاف سطح قوای فعلی و سطح قوای مورد انتظار بستگی دارد. رابطه‌ی ۴ نحوه‌ی محاسبه این توان اضافه‌شونده را نشان می‌دهد.

$$P_{bat} = \frac{SOC^* - SOC}{0.5(SOC_{high} - SOC_{low})} P_{char} \quad (4)$$

که SOC^* سطح قوای مطلوب بوده و از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید.

$$SOC^* = 0.5(SOC_{high} + SOC_{low}) \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۴، P_{char} میزان توان حداکثری برای تنظیم سطح قوای باتری است. زمانی که سطح قوای باتری به حد پایینی خود یا SOC_{low} برسد، توان اضافی P_{char} به توان درخواستی از سیستم پیل سوختی اضافه می‌شود. در این وضعیت، باتری توسط این توان اضافی پر خواهد شد. مفادیری که شبیه‌ساز برای حدود بالا و پایین سطح قوای باتری در نظر گرفته است، به ترتیب برابر $0/8$ و $0/4$ است.

۴- راهبردهای مدیریت انرژی

در ادامه‌ی این بخش به معرفی و مدل‌سازی دو راهبرد مدیریت انرژی در ساختار خودروی هیبرید پیل سوختی خواهیم پرداخت.

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

که η_b بازدهی باتری، P_s توان ویژه‌ی باتری و m_{module} وزن هر باتری برحسب کیلوگرم است. جدول ۳ مشخصات باتری سرب اسیدی نوعی را نشان می‌دهد [۱۱]. طبق اطلاعات جدول ۳ و رابطه‌ی ۳، حداقل ۲۱ باتری برای تامین توان مکمل قوای محرکه در طول رانندگی مورد نیاز است.

جدول ۳- مشخصات باتری

توان ویژه (W.kg ⁻¹)	انرژی ویژه (Wh.kg ⁻¹)	بازده (%)	وزن (kg)
180	28	90	11

۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی با

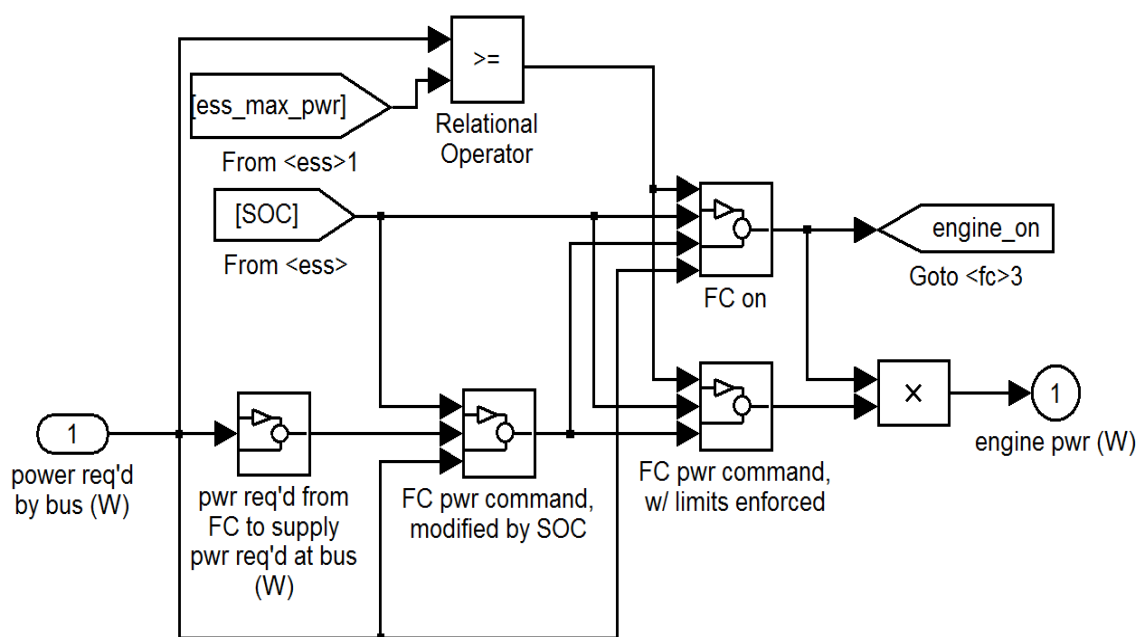
ADVISOR^۱

شبیه‌ساز ADVISOR، یک ابزار آنالیز و تحلیل سیستمی به منظور مدل‌سازی خودروهای پیشرفته است. ADVISOR در محیط سیمولینک متلب^۲ ایجاد شده است. این ابزار اصولاً برای مشخص کردن میزان صرفه‌جویی در سوخت، آلایندگی‌ها و کارایی خودروهایی به کاربرده می‌شود که از فناوری‌هایی چون پیل سوختی، باتری، موتور الکتریکی و موتور احتراق داخلی در پیکربندی هیبرید استفاده می‌کنند [۱۲]. نقش اساسی این شبیه‌ساز در مشخص کردن تعامل‌های سیستمی بین عناصر خودروهای الکتریکی هیبریدی و اثرات آن‌ها روی میزان صرفه‌جویی در سوخت و عملکرد خودرو است.

در این شبیه‌ساز کاربر می‌تواند با توجه به نیاز، 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 چرخه‌های رانندگی، شیب‌پیمایی و شتاب‌گیری هستند.

² MATLAB Simulink

¹ Advanced Vehicle Simulator



شکل ۳- مدل راهبرد انرژی مورد استفاده در شبیه‌سازی

این حالت‌ها شامل موارد زیر هستند:

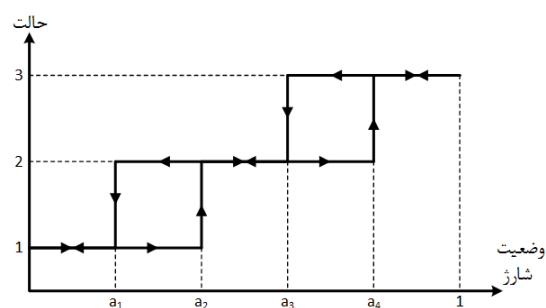
- حالت ۱: تخلیه شدن باتری (سطح قوای زیاد)
 - حالت ۲: پر یا تخلیه شدن باتری (سطح قوای متوسط)
 - حالت ۳: پر شدن باتری (سطح قوای کم)
- جدول ۴ مقادیر پارامترهای بکار گرفته شده در این راهبرد را نشان می‌دهد و مدل بلوکی این راهبرد نیز در شکل ۶ آورده شده است.

۴-۲- کنترل منطق فازی

سیستم‌های منطق فازی، پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند. سیستم‌های فازی سیستم‌هایی مبتنی بر دانش یا قواعد^۲ می‌باشند. قلب یک سیستم فازی، پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. نقطه‌ی شروع ساخت یک سیستم فازی، به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی توسط دانش افراد خبره یا اطلاعات حوزه‌ی مورد بررسی است. سیستم‌های فازی یک فرایند سامانمند^۳ را برای تبدیل پایگاه دانش به یک نگاشت غیرخطی فراهم می‌سازند.

۴-۱- راهبرد کنترل حالت عملکردی

راهبرد کنترل حالت عملکردی^۱ بر مبنای سطح قوای باتری و میزان توان درخواستی، توان کاری پیل‌سوختی را مشخص می‌کند. شکل ۴ چگونگی تعیین حالت‌های عملکردی را بر اساس سطح قوای باتری نشان می‌دهد.



شکل ۴- تعیین حالت عملکردی بر اساس سطح قوای باتری همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، تعیین حالت عملکردی مجموعه توسط دو حلقه‌ی هیستریزیس و بر اساس سطح قوای باتری صورت می‌گیرد. با توجه به سطح قوای باتری در هر لحظه و چگونگی تغییرات آن، یکی از سه حالت نشان داده شده در شکل ۵ انتخاب خواهد شد.

³ Systematic

¹ Operation Mode Control

² Knowledge-based or Rule-based system

جدول ۴- پارامترهای کنترل حالت عملکردی

پارامتر	توضیحات	مقدار
P_{fc-eff}	توان بهینه‌ی پیل سوختی	20 KW
P_{fc-min}	کمترین توان پیل سوختی	7.5 KW
P_{fc-max}	بیشترین توان پیل سوختی	47.5 KW
a_1	حد پایین حلقه‌ی هیستریزس اول	0.45
a_2	حد بالای حلقه‌ی هیستریزس اول	0.5
a_3	حد پایین حلقه‌ی هیستریزس دوم	0.6
a_4	حد بالای حلقه‌ی هیستریزس دوم	0.65

جدول ۵- مجموعه قواعد سیستم کنترل کننده‌ی منطق فازی

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

جدول ۶- پارامترهای توابع عضویت فازی

پارامتر	x_1	x_2	x_3	x_4
مقدار	0.25	0.5	0.75	1
پارامتر	y_1	y_2	y_3	
مقدار	0.5	0.65	0.8	
پارامتر	z_1	z_2	z_3	z_4
مقدار	0.1	0.175	0.325	0.4
پارامتر	z_5	z_6	z_7	z_8
مقدار	0.55	0.625	0.775	0.85

در این مقاله، سیستم کنترل فازی متشکل از موتور استنتاج ممدانی، فازی‌ساز تکین و غیرفازی‌ساز مرکز ثقل است. مقادیر اولیه‌ی طراحی شده برای پارامترهای توابع عضویت در جدول ۶ آورده شده است.

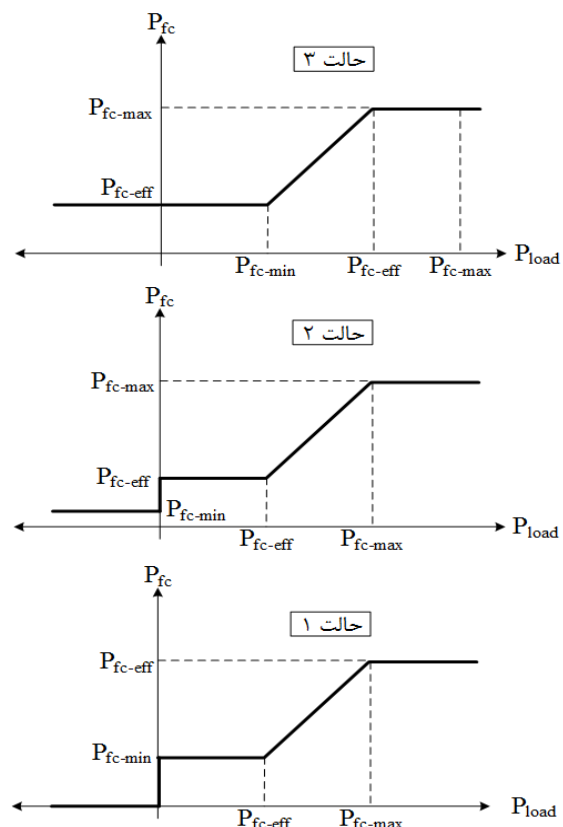
۵- بهینه‌سازی

اهداف بهینه‌سازی در تابع هدفی چندمنظوره بیان می‌شوند. در این مطالعه، اهداف شامل موارد زیر است:

- کمینه‌سازی مصرف انرژی معادل سوخت خودرو
- کمینه‌سازی مصرف سوخت هیدروژن
- افزایش بازده متوسط باتری و پیل سوختی

کنترل منطق فازی^۱، روش محاسبه‌ی خروجی‌هایی دقیق از ورودی‌های مبهم بر مبنای پایگاه دانش است. قواعد منطقی، جملاتی فازی از عملکردهای مورد انتظار هستند. کنترل منطق فازی از ابزار و رویه‌هایی برای تبدیل جملات نادقیق فازی به نتایج کمی و دقیق بهره می‌برد. کنترل منطق فازی یکی از پرکاربردترین راهبردهای مدیریت انرژی در خودروهای هیبریدی است. در این راهبرد، خروجی کنترل کننده‌ی فازی معرف میزان توان پیل سوختی است. توان درخواستی و سطح قوای باتری نیز به‌عنوان ورودی‌های کنترل کننده‌ی فازی شناخته می‌شوند. مدل بلوکی این راهبرد در شکل ۷ آورده شده است.

مجموعه قواعد فازی در نظر گرفته شده برای این کنترل کننده نیز در جدول ۵ آورده شده است.

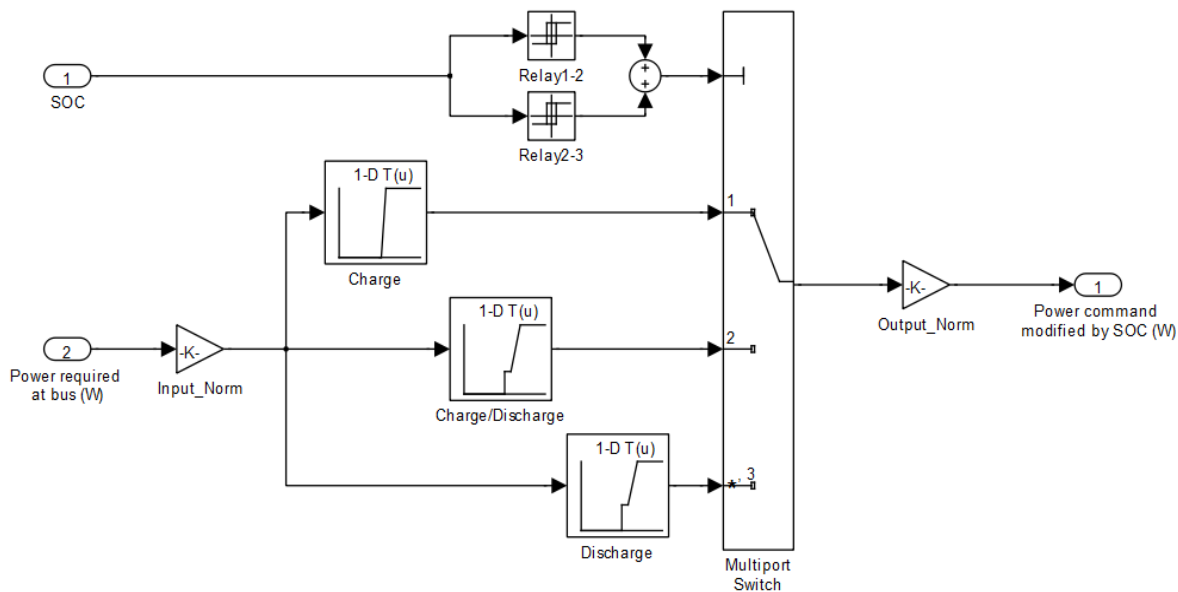


شکل ۵- مشخصه‌ی حالت‌های عملکردی

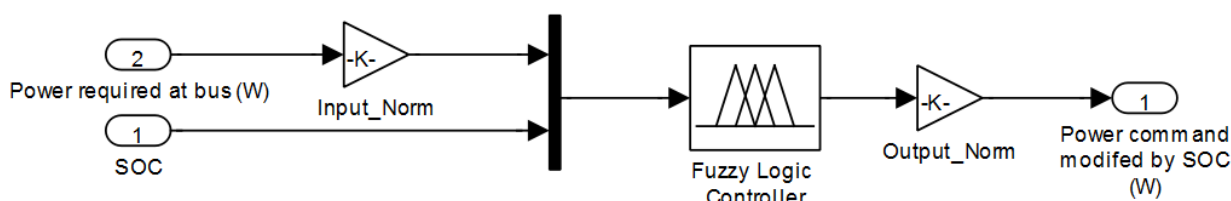
شکل ۸ توابع عضویت هر یک از ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده را به همراه متغیرهای زبانی ارزیابی شده در جدول ۵ نشان می‌دهد.

¹ Fuzzy Logic Control

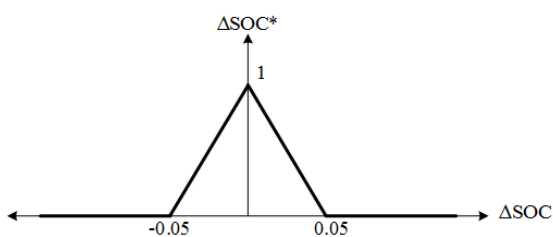
• حفظ سطح قوای باتری در طول چرخه‌ی رانندگی



شکل ۶- مدل راهبرد کنترل حالت عملکردی در شبیه‌ساز



شکل ۷- مدل کنترل‌کننده‌ی منطق فازی در شبیه‌ساز



شکل ۹- میزان برازندگی اختلاف سطح قوای نهایی باتری ضرایب w_1 تا w_5 مشخص‌کننده‌ی درجه‌ی اهمیت هر یک از اهداف هستند. مقادیری که به‌منظور هنجارسازی کمیت‌های MPG و $MPGGe$ استفاده می‌شوند، پس از تعیین چرخه‌های رانندگی مبنا محاسبه خواهند شد. چرخه‌ی رانندگی مورد‌استفاده در این تحقیق، تجمیعی از رانندگی شهری و بزرگراه است. چرخه‌ی رانندگی شهری

تابع برازش تعریف‌شده به‌منظور تحقق اهداف فوق که به‌ازای هر کروموزوم ارزیابی می‌شود، به‌صورت زیر است:

$$Fitness = w_1MPGGe^* + w_2MPG^* + w_3eff_{FC} + w_4eff_{batt} + w_5\Delta SOC^* \quad (6)$$

در تابع فوق، $MPGGe^1$ معرف میزان پیمایش برحسب مایل، به ازای انرژی معادل یک گالن بنزین است. MPG^2 میزان پیمایش برحسب انرژی یک گالن از سوخت است. علامت (*) در کنار این کمیت‌ها نشان از هنجار شدن آن‌ها توسط مقادیر پیشینه است. eff_{FC} متوسط بازده پیل‌سوختی و eff_{batt} متوسط بازده باتری است. ΔSOC^* نیز میزان ارزش داده‌شده برای اختلاف سطح قوای نهایی است که طبق شکل ۹ محاسبه می‌گردد.

² Miles Per Gallon

¹ Miles Per Gallon Gasoline equivalent

جریمه، تابع برازش را به مساله‌ی بهینه‌سازی بدون قید تبدیل می‌کند. نحوه‌ی استفاده از این تابع در رابطه‌ی ۹ آورده شده است.

$$P(x, \beta) = f(x) - \sum_{i=1}^p \beta_i g_i^2(x) \quad (9)$$

پارامتر β در فوق طبق رابطه‌ی ۱۰ تعیین می‌گردد. در این رابطه، عدم تحقق قید نامساوی جریمه‌ی زیادی در تابع برازش ایجاد می‌کند و از ارزش نهایی کروموزوم مورد ارزیابی کاسته می‌شود.

$$\beta_i = \begin{cases} 0 & g_i(x) \leq 0 \\ \rho & g_i(x) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

در نهایت، مساله‌ی بهینه‌سازی همانند رابطه‌ی ۱۱، به مساله‌ی بهینه‌سازی چند متغیره و بدون قید تبدیل خواهد شد.

$$Fitness = \sum_{n=1}^N w_n f_n - \sum_{i=1}^p \beta_i g_i^2(x) \quad (11)$$

محدودیت‌هایی که در ارزیابی تابع برازش در نظر گرفته می‌شوند، به صورت خلاصه در جدول ۷ آورده شده‌اند.

جدول ۷ - محدودیت‌های آزمون‌های عملکردی		
محدودیت	مقدار	تلورانس
شتاب‌گیری از ۰ تا ۹۷ کیلومتر بر ساعت (s)	12 >	0.04
شتاب‌گیری از ۶۴ تا ۹۷ کیلومتر بر ساعت (s)	5.3 >	0.04
شتاب‌گیری از ۰ تا ۱۳۷ کیلومتر بر ساعت (s)	23.4 >	0.04
شتاب بیشینه (m.s ⁻²)	5.3 <	0.4
سرعت بیشینه (Km.h ⁻¹)	145 <	0.4
مسافت طی شده در پنج ثانیه (m)	42.7 <	0.4
شیب‌پیمایی (%)	6.5 <	0.4

نتایجی که از آزمون‌های عملکردی شیب و شتاب به دست می‌آید، می‌بایست شرایطی را که در جدول فوق ذکر شده‌اند، برآورده سازند. علاوه بر این، مجذور تلفات سرعتی مسیر نیز به عنوان هزینه از تابع برازش کسر می‌شود.

که با چرخه‌ی FTP^۱ نیز شناخته می‌شود، یکی از پرکاربردترین چرخه‌ها در شبیه‌سازی است. چرخه‌ی رانندگی در بزرگراه نیز عموماً با نام مخفف HWFET^۲ شناخته می‌شود. در این مطالعه، ابتدا خودرو در شرایط اولیه‌ی سرد مسافتی را درون شهر طی کرده و پس از آن با شرایط محیطی گرم وارد بزرگراه می‌شود. سطح قوای باتری در طول این سفر پیوسته است، به نحوی که سطح قوا در ابتدای چرخه‌ی بزرگراه برابر سطح قوا در انتهای چرخه‌ی شهری است. از آنجایی که شبیه‌ساز عملاً دو چرخه‌ی حرکتی مجزا را می‌پیماید، به ازای هر یک از چرخه‌ها مقادیر متفاوتی برای کمیت‌ها تولید می‌کند. برای محاسبه‌ی مقادیر مرجع کمیت‌های پیمایشی که در هنجارسازی MPGGe و MPG مورد نیاز هستند، از رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود.

$$MPGGe = \frac{1}{\frac{0.55}{MPGGe_{FTP-Cold}} + \frac{0.45}{MPGGe_{HWFET-Hot}}} \quad (7)$$

با فرض اینکه راهبرد پیش فرض شبیه‌ساز، مقدار مشخصی برای کمیت‌های ترکیبی فوق محاسبه می‌کند، ۱/۲ آن مقدار به عنوان هدف برای هنجارسازی کمیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. بازدهی متوسط پیل سوختی و باتری در هر دو چرخه‌ی رانندگی میانگین‌گیری شده و سطوح قوای باتری نیز در چرخه‌ها جمع خواهند شد.

علاوه بر موارد فوق، به منظور سنجش توانایی راهبردها در آزمون‌های شیب‌پیمایی و شتاب‌گیری، محدودیت‌هایی به تابع برازش اضافه می‌شود. این محدودیت‌ها عموماً به صورت نامساوی بوده و به صورت قیدی از توابع جریمه در تابع برازش لحاظ می‌شوند. فرم کلی این توابع به صورت رابطه‌ی ۸ است.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && f(x) \\ & \text{subject to} && g_i(x) \leq 0 \quad i=1, \dots, p \end{aligned} \quad (8)$$

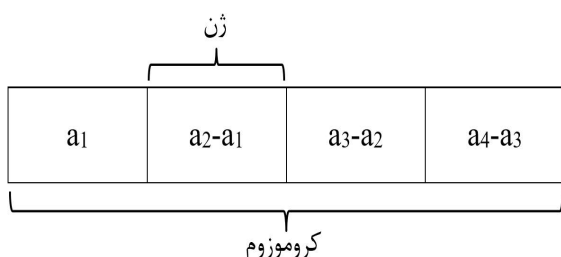
که $f(x)$ تابع برازش بوده و $g_i(x)$ مجموعه‌ای از قیدهای نامساوی است که می‌بایست برآورده شوند. استفاده از تابع

² Highway Fuel Economy Test

¹ Federal Test Procedure

۵-۱- الگوریتم ژنتیک

مشخص شده‌اند. یک راهکار برای تعیین مقادیر بهینه‌ی این پارامترها، استفاده از الگوریتم ژنتیک است. استفاده از الگوریتم ژنتیک نیازمند معرفی ساختار کروموزوم توسط پارامترهای راهبرد است. طبق شکل ۱۰، مجموعه پارامترهای a_1 تا a_4 در آرایشی خاص، کروموزومی با چهار ژن برای آرایه‌ی این راهبرد تولید می‌کنند. مقادیری که الگوریتم برای هر ژن در نظر می‌گیرد، اعدادی پیوسته و بین صفر و یک است.



شکل ۱۰- ساختار کروموزوم پارامترهای OMC

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر ژن‌های این کروموزوم از سمت چپ و به ترتیب با ژن‌های قبلی جمع شوند، مقادیر a_1 تا a_4 تولید خواهند شد. با تولید عددهای تصادفی بین صفر و یک برای هر ژن، ترتیب پارامترها رعایت شده و رابطه زیر همواره برقرار خواهد بود:

$$a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4 \quad (12)$$

اهمیت ترتیب پارامترها در ایجاد دو حلقه‌ی هیستریزس متوالی است. پس از بارگذاری متغیرهای بهینه‌سازی در محیط شبیه‌ساز، دو چرخه‌ی رانندگی و آزمون عملکردی با حضور راهبرد کنترلی انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به‌عنوان متغیرهای تابع برازش در رابطه‌ی ۱۱ توسط الگوریتم ژنتیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. درنهایت برای هر کروموزوم، مقدار برازندگی مشخصی محاسبه می‌شود. پس‌از آن الگوریتم روند بهینه‌سازی را به تعداد تکرارهای مشخص شده ادامه می‌دهد. با پیشرفت الگوریتم و رسیدن به تکرار نهایی، پارامترهای بهینه‌شده توسط کروموزومی که دارای بیشترین مقدار برازش است، مشخص خواهند شد. در این مطالعه، پارامترهای بهینه‌شده برای a_1 تا a_4 به ترتیب برابر $0/47$ ، $0/52$ ، $0/64$ و $0/75$ به‌دست آمده است.

الگوریتم ژنتیک، یک روش جستجو و بهینه‌سازی است که بر اساس علم وراثت و انتخاب طبیعی بنیان شده است. در الگوریتم ژنتیک مجموعه‌ای از افراد متفاوت یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. افراد جمعیت با استفاده از قواعدی خاص انتخاب و تکامل داده می‌شوند. یکی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی توابعی است که عموماً به‌صورت تجربی تنظیم می‌شوند. راهبردهایی که در بخش‌های قبل مطرح شدند از این نوع توابع هستند. تعیین پارامترهای الگوریتم نسبت به مواردی چون تابع برازش، محدوده پارامترها و شاخص‌های کارایی حساس است. به همین دلیل، تحقیقات مختلف در زمینه‌ی یافتن بهترین مقادیر برای پارامترها به نتایج متفاوتی می‌رسند. از میان پارامترهای موجود، مقادیر پارامترهای نرخ جهش و اندازه‌ی جمعیت از اهمیت ویژه‌ی برخوردار هستند. نتایج مطالعات در [۱۳] نشان می‌دهد که بهترین نرخ جهش برای الگوریتم ژنتیک پیوسته بین ۵ تا ۲۰ درصد قرار می‌گیرد. انتخاب بهترین کروموزوم‌ها برای جفت‌گیری، بر اساس نرخ انتخاب و روش چرخ رولت انجام می‌پذیرد. روش تولیدمثل نیز ترکیبی از جابجایی و درون‌یابی پارامترها است. علاوه‌براین، شرط توقف در این پژوهش به‌واسطه‌ی تکرار بهینه‌سازی طی تعداد نسل‌های مشخص و بررسی همگرایی در نسل‌های انتهایی تعیین شده است. جدول ۸ پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی راهبردهای مدیریت انرژی را نشان می‌دهد.

جدول ۸- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

اندازه‌ی جمعیت	نرخ انتخاب	نرخ جهش	تعداد تکرار
55	0.5	0.1	80

۵-۲- کنترل بهینه‌شده‌ی حالت عملکردی

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، راهبرد کنترل حالت عملکردی (OMC) از دو حلقه‌ی هیستریزس برای تعیین حالت عملکردی استفاده می‌کند. حدود بالایی و پایینی هر یک از حلقه‌های هیستریزس، با پارامترهای a_1 تا a_4

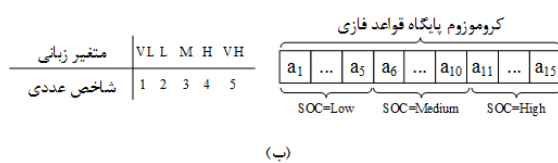
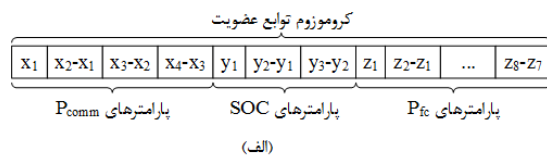
۵-۳- کنترل بهینه‌شده‌ی منطق فازی

الگوریتم ژنتیک می‌تواند برای بهینه‌سازی پایگاه داده یا قواعد کنترل منطق فازی مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. توابع عضویت دوزنقه‌ای و مثلثی به راحتی توسط دو یا سه پارامتر قابل توصیف هستند. با در نظر گرفتن توابع عضویت کامل و سازگار، علاوه بر پوشش کل فضای حالت، تعداد متغیر کمتری برای توصیف توابع عضویت مورد نیاز است. علاوه بر این، الگوریتم ژنتیک می‌تواند با استفاده از کروموزوم‌هایی حاوی کدهای هر یک از قواعد، در یافتن پایگاه قواعد بهینه و کارآمد مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، ابتدا توابع عضویت توسط یک پایگاه دانش اولیه بهینه‌سازی می‌شوند. پس از آن، بهترین تابع عضویت به دست آمده در مرحله‌ی قبل، در آموزش پایگاه قواعد مشارکت خواهد داشت. این فرایند تا رسیدن به شرط توقف ادامه دارد.

کروموزوم‌های توابع عضویت شامل آرایش خاصی از کل پارامترهای ارایه‌شده در فضای گفتگوی خروجی و ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی فازی است. در این تحقیق، کروموزوم‌های توابع عضویت و پایگاه قواعد از ۱۵ ژن تشکیل شده‌اند. ژن‌های پایگاه قواعد، حاوی اعداد کد شده به صورت صفر و یک هستند، ولی ژن‌های توابع عضویت می‌توانند مقادیری بین صفر و یک داشته باشند. در این کروموزوم‌ها نیز مشابه حالت قبل، پارامترهای بهینه‌سازی از جمع پیوسته‌ی ژن‌های مشخصی از کروموزوم‌ها به دست می‌آیند. کروموزوم پایگاه قواعد فازی از سه بخش پارامتری تشکیل شده است. این بخش‌ها شامل قواعد متناظر با سطح قوای پایین، متوسط و بالا می‌باشند. برای کروموزوم‌های توابع عضویت نیز این تفکیک برقرار است. پارامترهای توابع عضویت توان درخواستی، سطح قوای باتری و توان پیل سوختی در این کروموزوم قرار گرفته‌اند. نحوه‌ی آرایش پارامترها در کروموزوم‌های توابع عضویت فازی به همراه کدهای دودویی ژن‌های کروموزوم پایگاه قواعد فازی به طور کامل در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. از آنجایی که در الگوریتم ژنتیک پیوسته از مولد طبیعی استفاده می‌شود، ممکن است

مقادیر تجمیعی از یک بیشتر شوند؛ در این صورت مقادیر تجمیعی با هنجارسازی اصلاح می‌شوند. پس از اجرای الگوریتم ژنتیک همانند حالت قبل، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای توابع عضویت منطق فازی و متغیرهای زبانی بهینه‌شده برای پایگاه قواعد فازی به ترتیب در جدول‌های ۹ و ۱۰ آورده شده‌اند.



شکل ۱۱- ساختار کروموزوم پارامترهای منطق فازی (الف) توابع عضویت (ب) پایگاه قواعد

جدول ۹- پارامترهای بهینه‌شده‌ی توابع عضویت فازی

پارامتر	x_1	x_2	x_3	x_4
مقدار	0.49	0.77	0.8	1
پارامتر	y_1	y_2	y_3	
مقدار	0.12	0.59	0.6	
پارامتر	z_1	z_2	z_3	z_4
مقدار	0	0.08	0.2	0.4
پارامتر	z_5	z_6	z_7	z_8
مقدار	0.54	0.69	0.88	1

جدول ۱۰- پایگاه قواعد بهینه‌شده‌ی کنترل منطق فازی

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

۶- نتایج شبیه‌سازی و بررسی

در این بخش، پس از مدل‌سازی راهبردهای کنترلی در شبیه‌ساز و محاسبه‌ی پارامترهای بهینه‌ی آن‌ها، به بررسی عملکرد کلی راهبردها در طول چندین چرخه‌ی رانندگی و آزمون‌های عملکردی می‌پردازیم. مشخصات عمومی خودروی هیبرید پیل سوختی که شبیه‌سازی‌ها با آن صورت گرفته است، در جدول ۱۱ دیده می‌شود. چرخه‌های

داده شده‌اند. طبق نتایج چرخه‌های عملکردی در جدول ۱۲، کنترل بهینه‌شده‌ی منطق فازی یا Opt-FLC عملکرد بهتری در میزان پیمایش از خود نشان می‌دهد. در همه‌ی راهبردها، بیش‌ترین میزان پیمایش بر مبنای انرژی معادل یک گالن بنزین (MPG) و پیمایش بر مبنای انرژی یک گالن از سوخت (MPG) متعلق به راهبرد بهینه‌شده‌ی منطق فازی است. بهترین نتایج از دیدگاه تعادل سطح قوای باتری متعلق به راهبرد Opt-OMC یا همان کنترل بهینه‌شده‌ی حالت‌های عملکردی است. تغییرات سطح قوای باتری در این راهبرد عموماً صفر یا نزدیک به صفر است. در مورد چرخه‌ی UDSS، با اینکه اختلاف سطح قوای نهایی در راهبردها صفر نیست، ولی راهبرد بهینه‌شده‌ی کنترل حالت عملکردی کمترین مقدار را نسبت به سایر روش‌ها دارد. از طرف دیگر، کنترل منطق فازی بهترین نتایج را از نظر بازدهی پیل سوختی به دست آورده است. در تمام شبیه‌سازی‌ها، بازدهی متوسط پیل سوختی توسط راهبرد کنترل منطق فازی بیش از ۵۴ درصد است که این نشان‌دهنده‌ی کارکرد پیل سوختی در محدوده‌ی بهینه‌ی توانی خود است. از نظر بازدهی متوسط باتری، راهبرد کنترلی ADVISOR و راهبرد کنترل حالت عملکردی بهترین نتایج را به خود اختصاص داده‌اند. جدول ۱۳ میزان بهبود متوسط پیمایش معادل هر یک از راهبردها را نسبت به قبل از شبیه‌سازی آن و در مقایسه با راهبرد شبیه‌ساز ارایه می‌کند.

جدول ۱۳- میزان بهبود نسبی پیمایش در راهبردها

	MPG (%)	MPGGe (%)
OMC/ADV- PTC	27.08	27.80
FLC/ADV- PTC	-11.93	-11.51
Opt- OMC/OMC	-13.98	-14.02
Opt- FLC/FLC	61.79	62.07
Opt- OMC/ADV- PTC	5.85	6.33
Opt- FLC/ADV- PTC	41.97	42.96

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، هر دو راهبرد بهینه‌ی FLC و OMC عملکرد بهتری در زمینه‌ی پیمایش معادل نسبت به راهبرد شبیه‌ساز داشته‌اند، به‌نحوی که راهبرد Opt-FLC بیش از ۴۰ درصد بهتر از راهبرد شبیه‌ساز در راستای مصرف معادل سوخت عمل کرده است.

منتخب شبیه‌سازی شامل US06، HWFET، UDSS، FTP و ECE+EUDC هستند. قابل ذکر است که سطح اولیه‌ی قوای باتری در همه‌ی راهبردها ۰/۷ است.

جدول ۱۱- مشخصات خودروی هیبرید پیل سوختی

خودرو		
وزن بار (کیلوگرم)	592	وزن بدنه (کیلوگرم)
مساحت جلو (مترمربع)	2	فاصله دو محور (متر)
سیستم پیل سوختی		
توان بیشینه (کیلووات)	50	نوع سیستم پلیمری
بازدهی بیشینه (%)	60	وزن کلی (کیلوگرم)
منبع تغذیه		
ولتاژ نامی (ولت)	12	ظرفیت بیشینه (آمپرساعت)
تعداد باتری	25	وزن هر باتری (کیلوگرم)
ماشین الکتریکی		
توان بیشینه (کیلووات)	75	نوع موتور القایی AC
بازدهی بیشینه (%)	92	وزن کلی (کیلوگرم)

پس از مدل سازی هر یک از راهبردها و شبیه‌سازی آن‌ها در قالب مدیریت انرژی خودروی هیبرید پیل سوختی، نتایج ارایه‌شده در جدول ۱۲ برای اهداف بهینه‌سازی هر یک از چرخه‌های منتخب به دست آمده است.

همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، ADV-PTC معرف راهبرد کنترلی پیش‌فرض در شبیه‌ساز ADVISOR است. FLC کنترل‌کننده منطق فازی و OMC راهبرد کنترل حالت عملکردی است. Opt-OMC و Opt-FLC به ترتیب، راهبردهای بهینه‌شده منطق فازی و کنترل حالت عملکردی توسط الگوریتم ژنتیک است. این جدول نشان می‌دهد که راهبردهای بهینه‌سازی شده، نتایج نسبتاً بهتری در مقایسه با سایر راهبردهای کنترلی ارایه می‌کنند. در این جدول، نتایج بهتر در هر ردیف، با اعداد برجسته نشان

برآورده سازد. همان طور که در جدول ۱۴ مشاهده می شود، با در نظر گرفتن تلورانس مربوط به قیدها، همه راهبردها این شرایط را تامین کرده اند. در بعضی از راهبردها مانند راهبرد منطق فازی، نتایج خوبی در آزمون شتاب گیری به دست آمده است؛ ولی از آنجایی که در این مطالعه کیفیت برآورده شدن شرایط مورد نظر نبوده است، تامین شدن آن ها مهر تأییدی بر عملکرد قابل قبول راهبرد کنترلی است.

علاوه بر این، نتایج جدول فوق نشان می دهد که راهبرد Opt-OMC به اندازه ی راهبرد Opt-FLC عملکرد خوبی در این زمینه از خود نشان نمی دهد.

علاوه بر چرخه های رانندگی، آزمون های عملکردی شتاب گیری و شیب پیمایی نیز در شبیه سازی های راهبرد کنترلی در نظر گرفته شده اند. نتایج این آزمون ها در جدول ۱۴ آورده شده است.

همان طور که پیش از این ذکر گردید، نتایج آزمون های عملکردی می بایست قیدهای ارایه شده در جدول ۷ را

جدول ۱۲- نتایج شبیه سازی چرخه های رانندگی

ADV-PTC	OMC	FLC	Opt-OMC	Opt-FLC	پارامتر	چرخه
3.1	3.5	3.1	3.6	3.6	MPG	UDDS
46.1	51.5	46	52.9	53.3	MPGGe	
0.09	0.04	0.1	0.04	0.03	Δ SOC	
52.35	50.8	55.1	52.9	51.9	eff _{FC}	
84.24	83.5	82.3	82.7	82.1	eff _{batt}	US06
4.3	4.1	3.4	3.5	4.6	MPG	
63.1	60.3	50.6	51.4	67.7	MPGGe	
-0.07	-0.06	0.01	0	-0.1	Δ SOC	
54.57	54.9	56.2	55.9	54.4	eff _{FC}	HWFET
73.70	73.5	73.0	72.9	73.1	eff _{batt}	
5.6	6.5	4.1	4.9	6.9	MPG	
82	96.3	60.2	72.7	101.	MPGGe	
-0.03	-0.08	0.08	0	-0.09	Δ SOC	FTP
53.62	53.8	56.1	54.5	53.5	eff _{FC}	
82.84	82.3	82.3	82.8	82.8	eff _{batt}	
3.5	4.1	3.4	4.2	5.3	MPG	
51	60.4	50	61.8	78.6	MPGGe	ECE+ EUDC
0.09	0	0.1	0	-0.09	Δ SOC	
52.91	51.2	55.4	52.8	51.9	eff _{FC}	
82.86	83.2	81.6	82.8	82.0	eff _{batt}	
3.3	6.4	3	4.1	7	MPG	ECE+ EUDC
48	94	43.7	60.3	103.	MPGGe	
0.07	-0.08	0.1	0	-0.09	Δ SOC	
52.14	53.2	54.6	51.7	52.4	eff _{FC}	
84.05	81.8	82.1	81.9	83.2	eff _{batt}	

جدول ۱۴- نتایج شبیه سازی آزمون های عملکردی

ADV-PTC	OMC	FLC	Opt-OMC	Opt-FLC	پارامتر
11.1	9.8	9.2	9.8	10.1	زمان شتاب گیری از ۰ تا ۹۷ کیلومتر بر ساعت (s)
5.8	5	4.6	5	5.2	زمان شتاب گیری از ۶۴ تا ۹۷ کیلومتر بر ساعت (s)
22	19.9	19.8	19.9	20.9	زمان شتاب گیری از ۰ تا ۱۳۷ کیلومتر بر ساعت (s)
4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	شتاب بیشینه ($m.s^{-2}$)
157	157	157.2	157	157.2	سرعت بیشینه ($km.h^{-1}$)
51.6	54.2	55.5	54.2	53.5	مسافت طی شده در پنج ثانیه (m)
9	8.4	6.2	8.4	4	شیب پیمایی (%)

می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل بهینه‌شده‌ی منطق فازی در این محدوده کار می‌کند. خودروهای هیبرید متصل‌شونده یا Plug-in که اولویت آن‌ها میزان صرفه‌جویی در سوخت است، می‌توانند از این راهبرد در سیستم مدیریت انرژی خود بهره ببرند. در این خودروها، باتری‌ها عموماً از طریق شبکه‌ی برق شهری پر می‌شوند.

قسمتی که با شماره‌ی ۲ مشخص شده است، تعادل خوبی در میزان سطح قوای باتری در انتهای چرخه ارزیابی می‌کند. راهبرد بهینه‌شده‌ی کنترل حالت عملکردی در این محدوده کار می‌کند. از این راهبرد می‌توان در خودروهای هیبرید پیل‌سوختی معمولی استفاده کرد. در این خودروها، تعادل در سطح قوا به اندازه‌ی میزان صرفه‌جویی در سوخت اهمیت دارد.

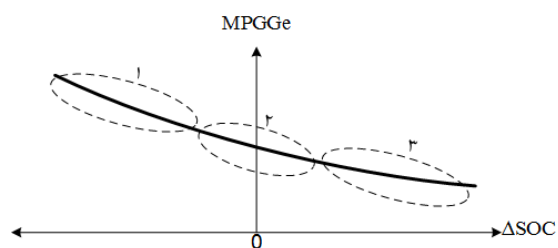
در نهایت، قسمتی که با شماره‌ی ۳ مشخص شده است، اختلاف سطح بالا و صرفه‌جویی در سوخت کمی ارزیابی می‌کند. طبق نتایج شبیه‌سازی، راهبرد منطق فازی در این محدوده کار می‌کند. کاربری این راهبرد می‌تواند در خودروهایی باشد که سطح قوای باتری از اولویت بیشتری برخوردار است، مانند خودروهای هیبرید پیل‌سوختی که از باتری به‌عنوان منبع توان اصلی بهره می‌برند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای کنترل منطق فازی و کنترل حالت عملکردی پرداخته شد. سپس، این راهبردها توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده و در مدل خودروی هیبرید پیل‌سوختی و باتری شبیه‌سازی شدند. این شبیه‌سازی شامل ۵ چرخه‌ی رانندگی و آزمون‌های شیب‌پیمایی و شتاب‌گیری بود. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان از برتری راهبردهای بهینه‌شده در مقایسه با راهبردهای بهینه نشده کنترل فازی و کنترل حالت عملکردی دارد. هردو راهبرد بهینه‌شده به‌صورت بر-خط قابل‌استفاده هستند و عموماً نتایج قابل قبولی ارائه می‌کنند. علاوه بر این، مشخص گردید که هر

با توجه به اینکه هر دو راهبرد توسط یک تابع برازش بهینه شده‌اند، ولی این‌طور به نظر می‌رسد که این راهبردها در زمینه‌ی خاصی از اهداف بهینه‌سازی خوب عمل می‌کنند. همه‌ی راهبردهای مدیریت انرژی ارزیابی‌شده در این مقاله توانایی هدایت و کنترل توان در خودروی هیبرید پیل‌سوختی را دارا می‌باشند، ولی با توجه به اولویت میزان پیمایش، تعادل سطح قوای باتری یا بازدهی منابع انرژی، می‌توان از همه‌ی راهبردهای مطرح‌شده استفاده کرد.

مجموعه‌ی مطالعات انجام‌شده در این مقاله نشان داد که صرف‌نظر از بازدهی متوسط منابع انرژی که تغییرات آن عموماً کمتر از ۵ درصد در هر راهبرد است، یک رابطه‌ی غیرخطی بین اختلاف سطح قوای باتری و میزان پیمایش وجود دارد. شمای کلی این رابطه که از اطلاعات شبیه‌سازی راهبردهای خودروی هیبرید پیل‌سوختی و باتری به‌دست‌آمده است، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- رابطه بین MPGe و ΔSOC

همان‌طور که در شکل ۱۲ قابل‌مشاهده است، افزایش اختلاف سطح قوا در انتهای چرخه‌ی رانندگی موجب کاهش میزان پیمایش و یا به عبارت دیگری، افزایش میزان مصرف سوخت می‌شود. در توضیح این پدیده می‌توان چنین اظهار کرد که با افزایش سطح قوای پایانی باتری نسبت به وضعیت اولیه‌ی آن، هیدروژن بیشتری توسط سیستم پیل‌سوختی برای پر شدن باتری مصرف می‌شود. از آنجایی که میزان مصرف سوخت با میزان پیمایش یا MPG نسبت عکس دارد، افزایش مصرف سوخت با کاهش میزان پیمایش توصیف می‌شود.

منحنی رسم شده در شکل ۱۲ به سه بخش تقسیم شده است. قسمتی که با شماره‌ی ۱ مشخص شده است، تغییرات سطح منفی داشته و صرفه‌جویی در سوخت مناسبی ارزیابی

MPGGe	میزان پیمایش به ازای انرژی معادل یک گالن بنزین
OMC	کنترل حالت عملکردی
FLC	کنترل منطق فازی
Opt-OMC	کنترل بهینه‌شده‌ی حالت عملکردی
Opt-FLC	کنترل بهینه‌شده‌ی منطق فازی
ADV-PTC	راهنما کنترلی در شبیه‌ساز ADVISOR
η_t	بازده‌ی سیستم انتقال قدرت
δ	ضریب جرمی عناصر دورانی
m	وزن خودرو
C_D	ضریب مقاومت آیرودینامیکی
ρ	چگالی جرمی هوا
A	سطح مقطع جلوی خودرو
g	شتاب گرانش
θ	زاویه‌ی شیب جاده
V	سرعت خودرو
P_{PS}	توان نامی منبع تغذیه ثانویه
P_m	توان بیشینه‌ی ماشین الکتریکی
P_{fc}	توان کاری سیستم پیل سوختی
P_{fc-min}	توان کمینه‌ی سیستم پیل سوختی
P_{fc-eff}	توان بهینه‌ی سیستم پیل سوختی
P_{fc-max}	توان بیشینه‌ی سیستم پیل سوختی
P_{load}	توان بار ورودی

یک از راهبردهای ارائه‌شده در ساختار پیل سوختی / باتری، قابلیت استفاده در نوع خاصی از خودروهای هیبرید پیل سوختی را دارا می‌باشند.

۸- علایم و اختصارات

ΔSOC	اختلاف سطح قوای باتری
η_m	بازده‌ی ماشین الکتریکی
η_b	بازده‌ی باتری
m_{module}	وزن هر باتری
SOC	سطح قوای باتری
SOC_{low}	حد پایین سطح قوا
SOC_{high}	حد بالای سطح قوا
VL	خیلی کم
L	کم
M	متوسط
H	زیاد
VH	خیلی زیاد
NL	منفی و کم
NM	منفی و متوسط
NH	منفی و زیاد
PL	مثبت و کم
PM	مثبت و متوسط
PH	مثبت و زیاد
eff_{FC}	متوسط بازده‌ی پیل سوختی
eff_{batt}	متوسط بازده‌ی باتری
FTP	چرخه‌ی رانندگی شهری
HWFET	چرخه‌ی رانندگی در بزرگراه
P_{comm}	توان درخواستی
P_{char}	توان حداکثری تنظیم سطح قوا
FC	پیل سوختی
MPG	میزان پیمایش به ازای انرژی یک گالن سوخت

۹- مراجع

- [1] L. Xu, J. Li, M. Ouyang, J. Hua, G. Yang, (2014), "Multi-mode control strategy for fuel cell electric vehicles regarding fuel economy and durability", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5): p. 2374-2389.
- [2] D. Fares, R. Chedid, S. Karaki, R. Jabr, F. Panik, H. Gabele, Y. Huang, (2014), "Optimal power allocation for a FCHV based on linear programming and PID controller", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36): p. 21724-21738.
- [3] García, P., et al., (2013), "Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor", *Expert Systems with Applications*, 40(12): p. 4791-4804.
- [4] Solano Martínez, J., et al., (2012), "A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles", *Information Sciences*, 190: p. 192-207.
- [5] Caux, S., et al., (2010), "On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5): p. 2134-2143.
- [6] Ehsani, M., Y. Gao, and A. Emadi, (2009), "Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design", CRC press.
- [7] Gao, Y. and M. Ehsani, (2001), "Systematic design of fuel cell powered hybrid vehicle drive train", *Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001. IEEE International*.
- [8] Gao, Y. and M. Ehsani, (2006), "Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicles", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 21(3): p. 749-755.
- [9] Nexa Power Module User's Manual. Ballard Power Systems Inc.
- [10] Uzunoglu, M. and M. Alam, (2006), "Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21(3): p. 767-775.
- [11] Fuhs, A., (2008), "Hybrid Vehicles: and the Future of Personal Transportation", CRC Press.
- [12] Same, A., et al., (2010), "A study on optimization of hybrid drive train using Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR)", *Journal of Power Sources*, 195(19): p. 6954-6963.
- [13] Haupt, R.L. and S.E. Haupt, (2004), "Practical genetic algorithms", John Wiley & Sons. 13: p. 93-121.
- [14] Herrera, F. and L. Magdalena, (1997), "Genetic Fuzzy Systems: A Tutorial", *Tatra Mt. Math. Publ. (Slovakia)*,