بهینه سازی کنترل کننده‌ی خودروی هیبرید الکتریکی با در نظر گرفتن استاندارد آلایندگی یورو ۳

صفیه السادات شیخعلیشاهی [۱]، مهدی میرزایی [۲]، سجاد آقاسی‌زاده شعرباف [۳] و رحیم خوشبختی سرای [۴]

[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، s_sheikhalishahi@sut.ac.ir

[۲] **نویسنده مسئول**، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، mirzaei@sut.ac.ir

[۳] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، s_aghasizade@sut.ac.ir

[۴] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، khoshbakhti@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۲/۷ تاریخ پذیرش مقاله۱۳۹۲/۵/۲۷)

چکیده: استراتژی کنترلی در خودروهای هیبرید الکتریکی تعیین کننده میزان مصرف انرژی توسط هر یک از موتورهای الکتریکی واحتراقی جهت تأمین توان مورد نیاز خودرو در هر موقعیت می‌باشد. یکی از نرم‌افزارهای متداول برای شبیه‌سازی رفتار و میزان مصرف سوخت خودروهای هیبریدی نرم‌افزار ADVISOR می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از معادلات غیرخطی حاکم بر این نرم‌افزار و برنامه نویسی جانبی سعی شده تا عملکرد یک کنترل کننده با استراتژی کمک الکتریکی بهینه گردد. معیار بهینه-سازی پارامترهای سیستم کنترلی، کمینه کردن مصرف سوخت خودرو ضمن نگهداری آلاینده‌ها در زیر سطح استاندارد یورو۳ و حفظ مشخصات حرکتی خودرو می‌باشد. بدین منظور شبیه‌سازی یک خودروی هیبرید موازی در دو سیکل حرکتی تهران و سیکل حرکتی آمریکا (FTP) انجام شد و پارامترهای کنترل‌کننده به کمک الگوریتم ژنتیک در حضور قیود حاکم به صورت بهینه انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده در هر سیکل حرکتی موجب کاهش مصرف سوخت ضمن ارضای قید استاندارد آلایندگی یورو ۳ و دیگر قیدهای حرکتی می‌شود. ضمناً با توجه به مشخصات و خصوصیات هر سیکل حرکتی، اعداد مختلفی به عنوان مقادیر بهینه استخراج شده‌اند که نشان از وابسته بودن پارامترهای کنترل کننده به سیکل حرکتی می باشد.

کلید واژه: خودروی هیبرید الکتریکی، مدل غیرخطی، بهینه سازی کنترل کننده، الگوریتم ژنتیک، مصرف سوخت، آلایندگی.

۱- مقدمه

آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و رو به پایان بودن منابع انرژی(سوخت‌های فسیلی) بعنوان مهم‌ترین مسائل عصر حاضر مطرح است. خودروهای هیبرید الکتریکی به عنوان یکی از راه‌حل‌های مشکل مصرف سوخت و آلایندگی در نظر گرفته می‌شود. این خودروها از ترکیب موتوراحتراقی و موتور الکتریکی برای تأمین توان مورد نیاز خود استفاده می‌کنند. با توجه به ساختار کنترلی و طریقه اتصال اجزا به یکدیگر، خودروهای هیبریدی به چهار نوع سری، موازی، سری-موازی و هیبرید مختلط تقسیم می‌شوند [۱]. در ساختار خودروی هیبرید موازی، موتور احتراقی و موتور الکتریکی توسط کوپلینگ مکانیکی به هم متصل‌اند تا انتقال قدرت صورت گیرد. بنابراین خودرو می‌تواند توسط موتور احتراق داخلی یا موتور الکتریکی و یا هر دو به

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

حرکت درآید. در این حالت باتری با تغییر حالت موتور الکتریکی به ژنراتور، شارژ می‌گردد. از آنجائیکه این سیستم فقط یک موتور دارد، موتور الکتریکی نمی‌تواند همزمان هم باتری را شارژ کند و هم باعث رانش چرخ‌ها گردد [۲].

مدیریت منابع تولید توان در خودروهای هیبریدی توسط استراتژی کنترلی خودرو که بر راندمان مصرف انرژی این خودرو مؤثر است، انجام می‌شود. سیستم خودروی هیبریدی یک سیستم پیچیده با متغیرهای طراحی گسسته است. بنابراین استفاده از روش‌های تحلیلی و مبتنی بر مدل برای کنترل این سیستم‌ها نیاز به ساده سازیهای زیادی دارد و و ارضای قیدهای مورد نظر طراحی در آن بسیار دشوار است. طراحی استراتژی‌های کنترل فازی نیز کاملاً بر مبنای دانش و تجربه طراح استوار است و پیچیدگی‌های زیادی مخصوصا در ارضای قیود طراحی دارند. در مقاله پیش‌رو از یک کنترل‌کننده استاندارد قانون مدار به نام کنترل‌کننده کمک الکتریکی بهره گرفته شده است و پارامترهای آزاد آن بهینه می‌گردد. این کنترل کننده که در بخش مربوطه به تفصیل به آن پرداخته شده است یک کنترل کننده پایه و مبنا با کارکرد نسبتاً خوب و قابل قبول به شمار می‌رود.

مطالعات انجام شده در مراجع نشان می‌دهند که استراتژی کنترلی بر بازده سیستم‌های هیبرید نقش اساسی دارد[۳, ۴]. مازندرانی و همکاران [۵] با رویکردی به منطق فازی سیستم مدیریت انرژی در خودرو هیبریدی را کنترل کردند و نتایج آن را با سایر کنترل کننده های رایج مقایسه و سپس آن را بهینه سازی نمودند و کاهشی در مصرف سوخت بوجود آوردند. در تحقیقی دیگر، اسکارتا و همکارانش [۶] مدیریت سوخت خودرو هیبریدی را با در نظر گرفتن قیود شارژ باتری به صورت صریح وبدون تأخیر با استفاده از قانون کنترل بهینه انجام دادند. نتایج این تحقیق که بر روی خودروهای هیبرید موازی انجام شد، ظرفیت ۳۰٪ کاهش مصرف سوخت را نشان داد که در سیکل‌های شهری این مقدار تا ۵۰٪ قابل افزایش است. اما این محققین تلاشی برای کاهش میزان آلاینده‌ها انجام ندادند و کاهش گازهای گلخانه‌ای جزء اهداف طراحی کنترل‌کننده آنها نیست. در همین سال دلپرات و همکارانش [۷] روش جدید و ساده‌ای مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی برای کاهش مصرف سوخت ارائه کردند که حجم محاسباتی کمتری داشت ولی این تحقیق نیز همانند تحقیق قبل کنترلی بر میزان تولید آلاینده‌ها نداشت.

واسودوان و همکارانش [۸] در مقاله خود کنترل‌کننده های خطی‌سازی فیدبک، مد لغزشی، بنگ بنگ و کنترل‌کننده قانون مدار را مورد بررسی قرار دادند و آنها را از نظر کارایی، مقاومت، پایداری و میزان کاهش مصرف سوخت مورد بررسی قرار دادند. برجسته‌ترین موضوع کار ایشان، ایجاد یک مدل جدید است ولی از نظر کنترلی به دلیل بکارگیری چندین کنترل‌کننده و شبیه-سازی مدل با همه آنها می‌تواند مورد توجه باشد.

مقدس و همکارانش [۹] نیز با ارائه یک کنترل کننده قانون مدار موسوم به کنترل ترموستات و شبیه‌سازی آن نشان دادند که در اثر فرایند هیبریدسازی می‌توان میزان مصرف سوخت خودروی بومی پراید را تا ۳۰٪ در سیکل حرکتی تهران کاهش داد.

در طراحی خودروهای هیبریدی اهداف متعددی بطور همزمان بایستی در نظر گرفته شوند که مهمترین آنها کاهش مصرف سوخت وکاهش میزان آلاینده‌های خروجی خودرو است. از آنجا که دستیابی به این اهداف به دلایلی که در ادامه بیان شده به صورت همزمان امکان‌پذیر نیست، بهینه‌سازی استراتژی کنترلی راهکار مناسبی برای کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها به شمار می‌رود. در دو تحقیق نزدیک انجام شده، منتظری و همکارانش در مرجع [۱۰] و همچنین هوانگ و همکارانش در مرجع [۱۱] بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی برای یک خودروی هیبریدی موازی را با روش الگوریتم ژنتیک با هدف بدست آوردن حداقل مقدار سوخت و آلاینده‌ها انجام دادند. این محققین سعی داشتند تا با کاهش همزمان مصرف سوخت و آلاینده‌ها به کارایی بهتری از سیستم دست یابند. این تحقیقات پایه بسیار خوبی برای تحقیقات بعدی به شمار می‌رود اما بایستی توجه کرد که مصالحه بین میزان کاهش مصرف سوخت و میزان کاهش آلاینده‌ها که می‌تواند بسیار مهم باشد در این مقالات به صورت اختیاری و بدون در نظر گرفتن معیاری استاندارد انجام پذیرفته است.

[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]

در مقاله حاضر استراتژی کنترلی یک خودروی هیبریدی در سیکل‌های حرکتی مختلف بهینه‌سازی شده است. نوآوری و تفاوت عمده کار حاضر با مطالعات قبلی، به اهداف بهینه‌سازی و بالاخص میزان کاهش آلاینده‌های زیست محیطی بر می‌گردد. در این تحقیق کاهش آلاینده‌ها تا زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که سطح تولید آنها بیشتر از مقدار مشخص شده در استاندارد یورو ۳ باشد و زمانی که سطح آلاینده‌ها به حد استاندارد رسید، مسئله بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده صرفاً برای کاهش مصرف سوخت ضمن حفظ آلاینده‌ها در حد استاندارد تلاش می‌کند. بدین ترتیب نوع نگاه به مسئله بهینه سازی در این مقاله از روش های مصالحه‌ای به روش مقید به استاندارد تغییر پیدا کرده است. با توجه به اینکه سازندگان خودرو میزان آلاینده‌ها را بر حسب استانداردهای یورو بیان می‌کنند، بنابراین در این مقاله با دید عملی و کاربردی به مسئله توجه شده و کاهش میزان مصرف سوخت تا حدی مورد توجه قرار گرفته است که میزان عددی آلاینده‌ها در حد مطرح شده در استاندارد یورو ۳ قرار بگیرد. با این روش از کاهش بی هدف میزان آلاینده‌ها جلوگیری به عمل آمده است و در شرایطی که آلاینده‌ها به حد زیر استاندارد رسیدند تمام وزن بهینه‌سازی روی کاهش مصرف سوخت معطوف می‌شود. این رویکرد قابل تعمیم به انواع خودرو های هیبریدی جهت ارتقای سطح آنها از یورو ۲ به یورو ۳ می‌باشد.

در ادامه مقاله ابتدا به روش‌های مختلف شبیه‌سازی و کنترل مصرف سوخت و مدیریت انرژی در خودروهای هیبریدی پرداخته می‌شود. در این قسمت به روش‌های مدلسازی رایج، الگوریتم‌های کنترلی و سیکل‌های حرکتی مختلف اشاره شده است. در بخش سوم مقاله به مسئله بهینه سازی پرداخته شده است. در این بخش تابع هدف و روش حل مسئله بهینه‌سازی شرح داده شده است. در دو بخش انتهایی ضمن ارائه نتایج شبیه‌سازی به تحلیل نتایج پرداخته شده است.

جدول ۱ : مشخصات خودروی شبیه سازی شده

پارامتر	توضیح
جرم بدنه	۵۹۲kg
ضریب مقاومت غلتشی	۰/۰۰۹
ضریب درگ آئرودینامیکی بدنه	۰/۳۳۵
سطح جلو خودرو	۲ m^2
شعاع چرخ	۰/۲۸۲ m
جعبه دنده	جعبه دنده پنج دنده دستی با نسبت دنده های: ۲/۸۴، ۳/۷۷، ۵/۰۱ ، ۵/۵۷ و۱۳/۴۵
موتور احتراقی	موتور اشتعال جرقه‌ای (Geo Metro) با توان ۴۱ kw
موتور الکتریکی	موتور AC (Westinghouse AC) با توان ۱۳/۵ kw
سیستم ذخیره انرژی	۱۴ عدد باتری اسید-سرب Hawker Genesis مدل 12V26Ah10EP

۲- روش شبیه‌سازی

هدف از شبیه‌سازی خودروهای هیبریدی، تعیین مقدار پارامترها و شاخص‌های آلایندگی و مصرف سوخت خودرو با اعمال یک استراتژی کنترلی در یک ورودی سیکل حرکتی مشخص می‌باشد. در شبیه‌سازی دو رویکرد متفاوت وجود دارد. شبیه‌سازی رو به جلو و شبیه‌سازی رو به عقب [۳]، که هرکدام برای انجام یک دسته از تحقیقات مفید است و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی خودروی هیبرید موازی از شبیه‌ساز خودروی پیشرفته ADVISOR استفاده شده است که در آن

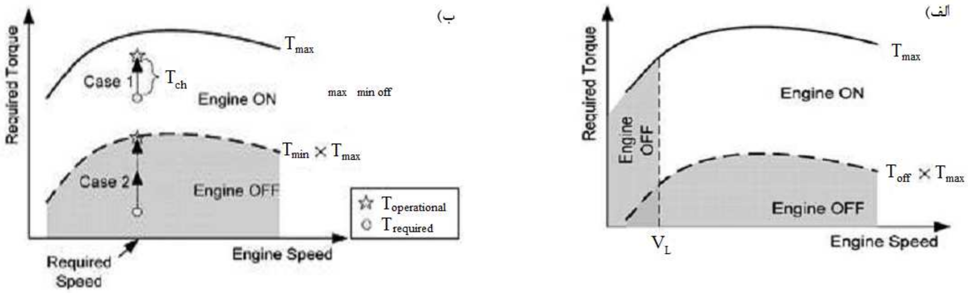
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

معادلات غیرخطی مربوط به تمامی اجزای سیستم محرکه و سیستم انتقال قدرت خودرو در حالت احتراقی و الکتریکی همراه با دینامیک خودرو و چرخ در محیط سیمولینک نرم افزار متلب نوشته شده است. این نرم افزار برای مدل‌سازی غیرخطی خودرو از یک روش ترکیبی روبه عقب/ روبه‌جلو استفاده می‌کند که در حقیقت به روش رو به‌عقب نزدیک‌تر است. تفاوت روش ADVISOR با روش‌های منحصراً روبه‌عقب، در اعمال محدودیت‌های عملکردی اجزاء و بکارگیری محاسبات ساده روبه‌جلو است [۱۲]. مشخصات خودروی هیبرید موازی بکارگرفته شده برای انجام شبیه‌سازی در جدول۱ آمده است.

۳- استراتژی کنترلی

استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت و تقسیم توان بین موتور الکتریکی و احتراقی در خودروهای هیبریدی وجود دارند. در این مقاله از استراتژی کنترلی کمک الکتریکی به عنوان استراتژی پایه استفاده شده است. در این کنترل‌کننده قوانین توزیع توان چنان وضع شده‌اند که وقتی موتور احتراقی نمی‌تواند در بازده مناسب کار کند یا توان بیشتری از توان قابل تحویل توسط موتور احتراقی برای تأمین سرعت مورد نظر نیاز باشد، موتور الکتریکی روشن شده و به این ترتیب سهم بار روی موتور احتراقی به‌گونه‌ای تراز می‌شود که نقاط کاری آن در نزدیکی نقاط عملکرد بهینه قرار گیرد.

در استراتژی کمک الکتریکی سعی می‌شود شارژ باتری‌ها در محدوده‌ی معینی که در آن مقاومت شارژ و دشارژ باتری کم است، نگهداری شود. چنانچه باتری‌ها نیاز به شارژ داشته باشند موتور احتراقی روشن خواهد بود و گشتاور اضافی برای شارژ باتری را نیز فراهم می‌کند. موتور احتراقی در مواردی در حالت خاموش قرار می‌گیرد و در این حالت‌ها موتور الکتریکی تمام گشتاور مورد نیاز را فراهم می‌کند. روش کنترل کمک الکتریکی در شکل۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است و متغیرهای کنترلی مورد استفاده در این استراتژی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱ : استراتژی کنترلی کمک الکتریکی: الف) در حالت $SOC>L_{SOC}$ ب) در حالت $SOC<L_{SOC}$ [۶]

شکل ۱- الف) حالتی که سطح شارژ باتری[۱] بیشتر از حد کمینه باشد را نشان می‌دهد. در این حالت اگر سرعت مورد نیاز برای طی سیکل حرکتی کمتر از مقدار V_L باشد، موتور احتراقی خاموش خواهد شد. در صورتی‌که گشتاور مورد نیاز کم‌تر از گشتاور آستانه‌ی خاموشی[۲] ($T_{off}\times T_{max}$) باشد نیز موتور احتراقی خاموش خواهد شد. شکل ۱- ب) حالتی را نشان می‌دهد که سطح شارژ باتری از مقدار حداقل کمتر باشد. در این حالت موتور احتراقی باید گشتاور اضافی T_{ch} برای شارژ باتری تولید کند که این گشتاور

[۱] State of Charge (SOC)
[۲] Cut Off

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

متناسب با اختلاف بین سطح شارژ باتری با مقدار میانگین بیشنه و کمینه سطح شارژ باتری است. تقاضای گشتاور شارژ فقط وقتی موتور احتراقی روشن است، انجام می‌شود. اگر نقطه‌ی کاری موتور احتراقی در نقطه‌ای بالاتر از $T_{min}\times T_{max}$ باشد، تنها گشتاور مورد نیاز (گشتاور مورد نیاز برای حرکت بعلاوه گشتاور مورد نیاز شارژ) به آن اعمال می‌گردد (حالت۱) و اگر گشتاور مورد نیاز پایین‌تر از حد $T_{min}\times T_{max}$ باشد، موتور احتراقی در روی خط حداقل گشتاور کار می‌کند (حالت۲).

جدول ۲ : پارامترهای موجود در استراتژی کنترلی کمک الکتریکی

پارامتر	توضیحات
L_{SOC}	مقدار تعیین شده حداقل سطح شارژ مجاز باتری
H_{SOC}	مقدار تعیین شده حداکثر سطح شارژ مجاز باتری
V_L(m/s)	سرعتی که در کمتر از آن سرعت، خودرو صرفاً الکتریکی عمل می‌کند.
T_{off}	ضریبی از گشتاور حداکثر است که اگر گشتاور مورد نیاز در یک سرعت معین از آن کم‌تر باشد موتور احتراقی خاموش می‌شود.
T_{min}	ضریبی از گشتاور حداکثر است ونشان‌دهنده‌ی حداقل گشتاوری است که باید از موتور احتراقی گرفته شود در حالتی که سطح شارژ باتری کم‌تر از L_{SOC} باشد.
T_{ch}(N.m)	گشتاور اضافی که برای شارژ باتری از موتور احتراقی گرفته می‌شود.

انتخاب بهینه هر کدام از پارامترهای فوق که به نوعی استراتژی کنترلی را تعیین می کنند می تواند در عملکرد خودروهای هیبریدی از نظر مصرف سوخت، میزان آلاینده‌ها و همچنین مشخصات حرکتی خودرو تأثیر گذار باشد. با توجه به اینکه شرایط ترافیکی و رانندگی در مناطق مختلف جهان متفاوت می‌باشد، لذا در تعیین مقادیر بهینه هر کدام از پارامترهای کنترل کننده بایستی مشخصات سیکل حرکتی هر منطقه نیز مورد توجه قرار گیرد.

٤- سیکل حرکتی

سیکل‌های حرکتی نمودارهای سرعت-زمان هستند که برای ارزیابی میزان مصرف سوخت، آلاینده‌ها و شبیه‌سازی خودروها بوجود آمده‌اند و بیانگر شرایط ترافیکی و رانندگی در مناطق مختلف هستند. با استفاده از سیکل‌های حرکتی، رفتار راننده مدل می‌شود و عملکرد موتورهای احتراق داخلی، سیستم انتقال قدرت، سیستم‌های الکتریکی و باتری‌ها پیش‌بینی می‌شود.

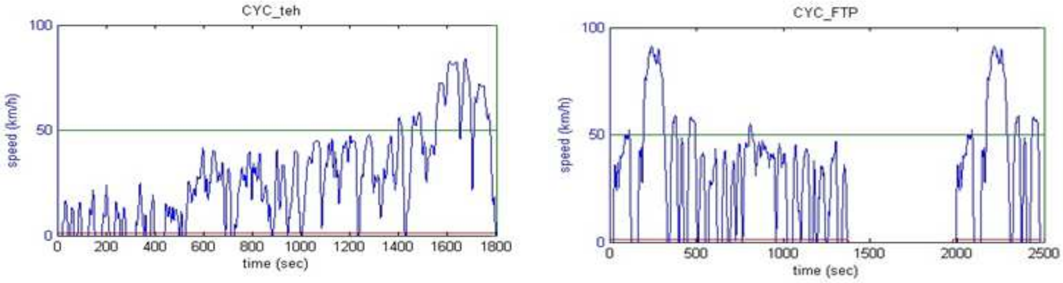
با استفاده از شرایط شهرسازی، ترافیکی و نیز الگوی رانندگی در شهر تهران یک سیکل رانندگی به نام THE_CAR بدست آمده است[۱۳]. همچنین سیکل FTP برای ارزیابی میزان آلایندگی وسایل نقلیهٔ مسافری در آمریکا استفاده می‌شود[۱۲]. این دو سیکل حرکتی که در شکل۲ نمایش داده شده‌اند، در این مقاله به عنوان سیکل حرکتی شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. این دو سیکل به دلیل وجود تفاوت‌هایی در آن و ضمناً بررسی شرایط رانندگی در ایران و تفاوت آن با سیکل استاندارد آمریکا انتخاب شده‌اند.

سیکل تهران با توجه به نحوه شهرسازی ایران با سرعت‌های کم شروع شده و دارای ترمزگیری‌های زیادی است که احتمالا ناشی از وجود کوچه‌ها و تقاطع‌هاست. در ادامه این سیکل به قسمت خیابان‌های اصلی و در نهایت به قسمت بزرگراهی ختم می‌شود. این در حالی است که سیکل آمریکا با قسمت بزرگراهی آغاز شده و میانگین سرعت بالاتری دارد. همچنین این سیکل نسبت به سیکل

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

تهران از توقف‌های کمتری برخوردار است. با توجه به تفاوت‌های ذکر شده همانطور که در بخش‌های بعدی نیز به آن اشاره شده، هر سیکل نیاز به بهینه‌سازی‌های مختلف و جداگانه‌ای دارد.

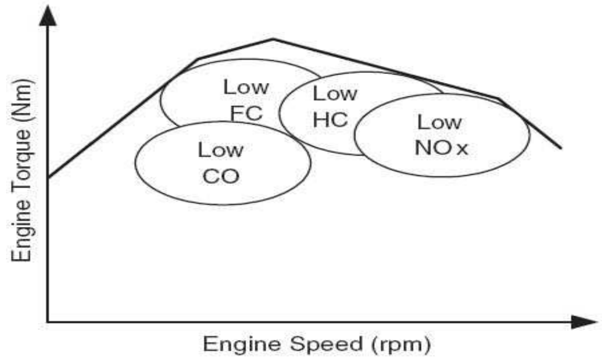
الف) ب)



شکل ۲: سیکل‌های رانندگی : الف) FTP ب) سیکل تهران

۵- مسئله بهینه‌سازی

در مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای موجود در استراتژی کنترلی کمک الکتریکی خودرو هیبریدی که در جدول ۲ تعریف شده است، با هدف کاهش مصرف سوخت و حفظ میزان آلاینده‌ها در محدوده استاندارد به صورت بهینه انتخاب می‌شوند. همانطور که از شکل۳ مشاهده می‌شود کاهش سوخت لزوماً منجر به کاهش آلاینده‌ها نمی‌شود و در مواردی این قیود در تضاد با یکدیگر بوده و در یک موقعیت مشابه ارضا نمی‌شوند. بنابراین، دستیابی به کمینه‌ی مطلق مصرف سوخت و آلاینده‌ها به‌صورت همزمان امکان‌پذیر نیست و چاره‌ای جز مصالحه بین آن‌ها وجود ندارد. از طرف دیگر کمینه کردن مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی خودرو منجر به کاهش عملکردهای دینامیکی خودرو مانند شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی می‌شود، به همین دلیل استانداردهای عملکردی برای سنجش کمی رفتار خودرو تعریف شده است. در مسائل بهینه‌سازی سعی بر آن است تا یک تابع هزینه مطابق با خواسته‌های مسئله به‌گونه‌ای انتخاب شود که کمینه کردن آن در حضور قیود حاکم منجر به رسیدن به خواست مسئله باشد.



شکل ۳: مکان هندسی نقاط عملکردی موتور اشتعال جرقه‌ای [۱۴]

۶- تابع هدف

توابع هدف زیادی در مقالات مختلف برای بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش میزان آلاینده‌ها استفاده شده است که ساختار

[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]

کلی آنها به شکل زیر است[۱، ۳، ۱۰، ۱۱، ۱۴]:

$$J = w_1\,FC + w_2\,NOx + w_3\,HC + w_4\,CO \qquad (۱)$$

در توابع هدفی با شکل بالا چندین فاکتور وزن‌دهی($w_i \quad i=1,\dots,4$) در نظر گرفته می‌شود که این مقادیر با توجه به سعی و خطا و متناسب با خودروی شبیه‌سازی شده بدست می‌آید. این وزن‌ها معمولاً به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بهینه‌سازی مطلوبی را روی همه عوامل دخیل در تابع هدف داشته باشند. ولی گاهی با وجود هدف‌گذاری، این ترتیب وزن‌دهی قادر به ارضای اهداف از پیش تعیین شده به صورت کامل نیست. این مسئله در هدف‌گذاری و نتایج مرجع [۱۱] به خوبی قابل مشاهده است.

بنابراین، در مقاله‌ی حاضر بر اساس یک دید عملی و کاربردی به مسئله، یک تابع هدف جدید به صورت ترکیب وزنداری از مقدار مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها در مقایسه با استاندارد یورو ۳ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$J = FC + \alpha\left[sgn(NOx - NOx_{\text{استاندارد}}) + 1 + sgn(HC - HC_{\text{استاندارد}}) + 1 + sgn(CO - CO_{\text{استاندارد}}) + 1\right] \qquad (۲)$$

در این تابع، FC میزان مصرف سوخت به ازای لیتر در هر صد کیلومتر پیمایش مسیر می‌باشد، همچنین NOx، HC و CO به ترتیب نمایانگر میزان گازهای اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و منو اکسیدکربن موجود در اگزوز به ازای صد کیلومتر پیمایش می‌باشند. نسبت وزنی α تعیین کننده اهمیت نسبی میزان مصرف سوخت و آلاینده ها می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌شود در تابع هدف تعریف شده، هرکدام از مشخصه‌های آلایندگی که در محدوده مجاز قرار بگیرند مقدار صفر را برمی‌گردانند و وقتی در محدوده مجاز نباشد، مقدار 2α را بر می‌گردانند. چون نسبت وزنی α مقدار خیلی بزرگ ($\alpha \gg 1$) انتخاب می شود، بنابراین با کمینه کردن تابع هدف ابتدا میزان آلاینده‌ها در حد استاندارد قرار گرفته و سپس به کمینه کردن مقدار مصرف سوخت پرداخته می‌شود. در مجموع با کمینه کردن تابع هدف تعریف شده، مقادیر بهینه پارامترهای تصمیم‌گیری به‌گونه‌ای محاسبه می‌گردند که کمترین مصرف سوخت را در شرایط ارضای قید آلایندگی متناسب با استاندارد یورو ۳ داشته باشد. ملاحظه می‌گردد تابع هدف تعریف شده‌ی (۲) قابل استفاده برای انواع خودروها جهت ارتقاء سطح آنها بر اساس استاندارد می‌باشد و نیاز به تنظیم ضرایب وزنی توسط طراح وجود ندارد. لازم بذکر است که سازندگان خودرو معمولاً میزان آلاینده‌ها را بر حسب استانداردهای یورو بیان می‌کنند. حداکثر مقدار مجاز آلاینده‌ها در استاندارد یورو۳ در جدول۳ آمده است.

جدول ۳: معیار آلایندگی برای خودروهای بنزینی تجاری کم وزن سبک‌تر از ۱۳۰۵ کیلوگرم (gr/km) [۱۵]

استاندارد	تاریخ	CO	NOx	HC
یورو۳	۲۰۰۰	۲/۳	۰/۱۵	۰/۲

به‌منظور اعمال قید مشخصه‌های حرکتی در مسئله بهینه‌سازی، صرفاً شرایطی مجاز به شرکت در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشند که مشخصه‌های عملکردی خودرو از قبیل رسیدن به حداکثر سرعت موجود در سیکل حرکتی و قابلیت شیب‌پیمایی را داشته باشند و پارامترهایی که نتوانند شرایط مطلوب را ارضا نمایند با قرار دادن یک مقدار بالا بجای تابع هزینه عملاً از چرخه بهینه‌سازی حذف می‌شوند. یا به عبارت دیگر، تنها متغیرهایی برای بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شوند که مشخصه‌های حرکتی آن در محدوده مجاز باشند و بهینه‌سازی باعث افت شاخص‌ها نشود.

حال مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف تعریف شده در رابطه (۲) به شکل زیر در می‌آید.

$$\underset{x \in X}{minimize}\ J(x) \qquad (۳)$$

که در آن x یک جواب بهینه برای مسأله است که برداری شامل متغیرهای طراحی است. X فضای حل می‌باشد که شامل محدوده

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

تغییرات متغیرها است.$J(x)$ تابع هدف تعریف شده در رابطه (۲) می‌باشد.

۷- روش حل

ویژگی مهم مسأله بهینه‌سازی تعریف شده در قسمت قبل این است که تابع هدف آن ناپیوسته و وابسته به یک مدل پیچیده غیرخطی از خودروی هیبریدی است که روابط آن در نرم‌افزار ADVISOR موجود می باشد. همچنین مسأله شامل قیدهای غیرخطی و متغیرهای طراحی گسسته است. بنابراین روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان برای حل این مسأله با مشکل مواجه می‌شوند و احتمالاً به نقاط بهینه محلی همگرا می‌شوند. پس روش‌های بهینه‌سازی مستقل از گرادیان و جستجوی تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک مناسب است.در این تحقیق با توجه به مشخصات سیستم و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای آزاد کنترل‌کننده کمک‌الکتریکی بهینه می‌شوند. المان‌های اصلی در الگوریتم ژنتیک، تابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. با تهیه مدل سیستم و استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی می‌توان پارامترهای عملکردی سیستم را بهبود داد و تا حد امکان به سیستمی مطلوب از نظر مصرف سوخت و آلایندگی رسید. شبیه‌سازی در دو سیکل حرکتی تهران وFTP آمریکا انجام می‌شود.

برای بهینه‌سازی استراتژی کنترلی باید متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شوند. این متغیرها همان پارامترهای کنترلی موجود در استراتژی کنترلی هستند که با حدود بالا و پایین در جدول ۴ آمده‌اند.

جدول ۴: محدوده‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری

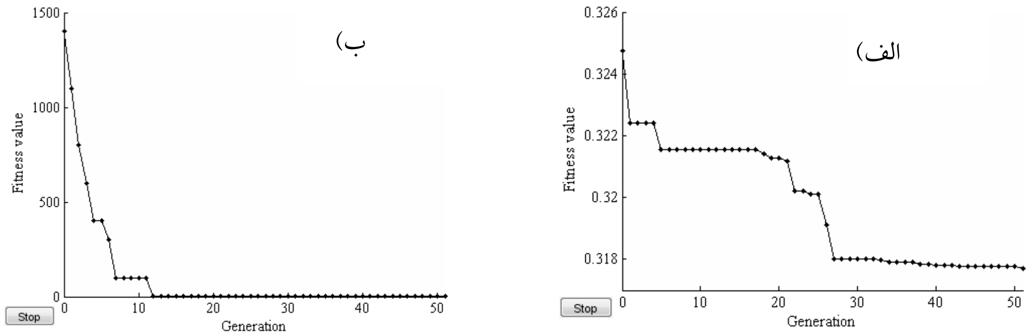
متغیر	حد بالا	حد پایین
L_{SOC}	۰/۷	۰/۵
H_{SOC}	۰/۸	۰/۶
V_L(m/s)	۱۵	۰
T_{off}	۰/۳۱	۰
T_{min}	۰/۸۸	۰/۲۵
T_{ch} (N.m)	۳۵	۴

۸- نتایج شبیه‌سازی

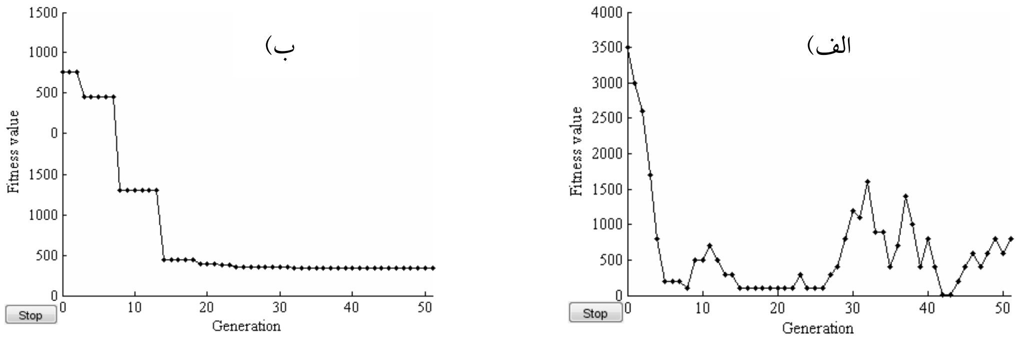
شبیه سازی‌ها در دو سیکل حرکتی تهران و FTP و بر روی خودروی هیبرید موازی با مشخصات ارایه شده در جدول۱ انجام می شود.

پس از حل مسئله بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک، مقدار تابع هدف J پس از ۵۰ بار تولید مثل (نسل ۵۱ ام) به مقدار کمینه خود رسیده و در آن ثابت باقی می ماند. در نتیجه می توان گفت در این محدوده، مجموعه جواب های بهینه قرار گرفته اند. روند بهینه-سازی در دو منحنی مربوط به شکل ۴ مربوط به بهترین عضو هر نسل می باشد که در سیکل تهران وآمریکا اتفاق می افتد. شکل ۵ نیز مقدار متوسط تابع هزینه در هر نسل را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشهود است، با گذشت مراحل حل و پیشرفت الگوریتم و نسل‌ها، میانگین تابع هزینه کاهش می‌یابد که نشان دهنده ارضای قیود آلایندگی توسط تعداد بیشتری از اعضای یک نسل است. ضمناً در شکل مربوط به بهینه‌سازی در سیکل تهران، گاهاً افزایش‌هایی در میانگین نسل‌ها دیده می‌شود که به دلیل وجود ۲۰٪ جهش ژنتیکی در تولید نسل بعدی است. این جهش ژنتیکی در رسیدن به مقدار مطلق و پوشش کل حوزه ورودی کمک می‌کند هرچند که گاهی باعث عدم تعالی یک نسل می‌شود.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]



شکل ۴: تابع هدف J بر حسب تعداد تولید مثل در بهترین مولود هر نسل برای سیکل رانندگی : الف) تهران ب) FTP



شکل ۵: میانگین تابع هدف J بر حسب تعداد تولید مثل در یک نسل برای سیکل رانندگی: الف) تهران ب) FTP

همان‌طور که نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان می‌دهد، مقدار T_{ch} ، گشتاور لازم برای شارژ باتری، برای دو سیکل تقریباً در محدوده‌ی یکسانی قرار دارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه این پارامتر کنترلی به نوع سیکل حرکتی وابسته نیست. مقدار بهینه‌شده‌ی پارامتر کنترلی V_L برای سیکل تهران از سیکل FTP کم‌تر است چون سیکل تهران مدت زمان زیادی را در سرعت‌های پایین طی می‌کند و در این سرعت‌های کم اگر موتور بخواهد مدام تغییر حالت بدهد حالت بهینه مصرف سوخت بوجود نمی‌آید، بنابراین یک سرعت پایین‌تر برای تغییر فاز، نتیجه‌ی بهتری را در پی خواهدداشت. همانطور که از جدول ۵ به راحتی قابل دریافت است در میان پارامترهای بهینه‌سازی شده T_{off} و T_{min} بیشترین وابستگی را به نوع سیکل حرکتی دارد.

جدول ۵: مقدار متغیرهای کنترلی بهینه سازی شده در سیکل تهران و FTP

پارامتر	سیکل تهران	FTP
L_{SOC}	۰/۵۳	۰/۵۲
H_{SOC}	۰/۷۸۲	۰/۸
V_L (m/s)	۳/۲	۱۳/۵
T_{off}	۰/۲۳۴	۰/۱۲۳
T_{min}	۰/۵۲۴	۰/۴۴
T_{ch}(N.m)	۳۴/۹۳	۳۴/۹۵

در جداول ۶ و ۷ مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها در سیکل‌های حرکتی با پارامترهای کنترلی بهینه شده و بدون بهینه‌سازی این

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

پارامترها نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در جداول بهبود قابل ملاحظه‌ای را در کاهش مصرف سوخت نشان می‌دهد.

این جداول نشان می‌دهند میزان مصرف سوخت با بهینه سازی پارامترهای کنترلی،کمتر شده است. بهبود مصرف سوخت در سیکل تهران ۹/۵٪ و در سیکل FTP ۱۰/۲٪ است. همانطور که دیده می‌شود میزان آلاینده‌ها در سیکل حرکتی کمتر از میزان آلایندگی مجاز در استاندارد آلایندگی یورو۳ است، هر چند در موارد کمی سطح آلاینده‌ها نسبت به حالت بهینه نشده افزایش داشته است. این نکته خود گواهی بر این حقیقت است که کاهش مصرف سوخت لزوماً به معنای کاهش سطح آلاینده‌ها نیست.

جدول ۶: مصرف سوخت و آلاینده‌های تولیدی در سیکل تهران (در حالت بهینه‌شده و بدون بهینه‌سازی)

متغیر	خودروی هیبرید بدون بهینه سازی	خودروی هیبریدی بهینه سازی شده
مصرف سوخت(L/100km)	۵/۸۶	۵/۳۱
HC(g/km)	۰/۲۷	۰/۱۶۹
Nox(g/km)	۰/۱۸۴	۰/۱۴۸
CO(g/km)	۰/۸	۰/۸۰۶

جدول ۷: مصرف سوخت و آلاینده‌های تولیدی در سیکل FTP (در حالت بهینه‌شده و بدون بهینه‌سازی)

متغیر	خودروی هیبرید بدون بهینه سازی	خودروی هیبریدی بهینه سازی شده
مصرف سوخت(L/100km)	۵/۷۷	۵/۱۸
HC(g/km)	۰/۲۵۸	۰/۱۵۷
Nox(g/km)	۰/۱۸۶	۰/۱۳
CO(g/km)	۰/۷۲۲	۰/۷۳

۹- نتیجه گیری

نتیجه‌ی مهمی که از بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی گرفته شد وابستگی بسیاری از پارامترها به سیکل رانندگی است. این بدین معنا است که اگر پارامترهای استراتژی کنترلی بسته به شرایط رانندگی تنظیم شوند بهبود مصرف سوخت و کاهش نشر آلاینده‌ها عملی‌تر خواهد شد. با مقایسه سیستم خودروی هیبریدی بهینه نشده و هیبریدی که پارامترهای کنترل کننده در آن بهینه شده‌اند، کاهش مصرف سوخت در هر سیکل رانندگی هنگامی که پارامترهای کنترلی بهینه می‌شود، مشاهده شد. میزان نشر آلاینده‌ها با هیبرید شدن خودرو نسبت به خودرو معمولی کاهش زیادی دارد اما با بهینه سازی پارامترهای کنترل‌کننده در سیکل حرکتی خاص می‌توان علاوه بر ایجاد کاهش کلی در آلایندگی و رعایت استاندارد یورو ۳ به کمینه مصرف سوخت دست یافت.

همچنین با توجه به پارامترهای بهینه شده الگوریتم کنترلی می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت در مقدار سرعت حداقل و گشتاور وضعیت خاموش موتور نسبت به سایر پارامترها، حساسیت بیشتری به سیکل حرکتی دارند. این تفاوت اعداد نشان می‌دهد که سیکل‌های حرکتی مثل تهران که دارای توقف‌های زیاد و طیف سرعتی وسیع می باشند نیاز به سرعت حداقلی کمتر و گشتاور وضعیت خاموش بزرگتری دارند. علاوه بر این، از قسمت نتایج مندرج در جداول ۶ و ۷ می‌توان دریافت که الگوریتم بهینه‌سازی در هر دو سیکل حرکتی قادر به ارضای قید آلایندگی مصرف سوخت یورو ۳ شده است، اما در سیکل تهران به دلیل توقف‌های بسیار زیاد و ترمزهای متوالی، مصرف سوخت بهینه شده کمی بیشتر از مصرف سوخت در سیکل حرکتی FTP می‌باشد.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]

مراجع

[1] Chan C., Bouscayrol A., and Chen K., " Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(2), 589-598.

[2] Zhang X. and Mi C., Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization: Springer, 2011.

[3] Buerger S., Lohmann B., Merz M., Vogel-Heuser B. and Hallmannsegger M., " Multi-objective optimization of hybrid electric vehicles considering fuel consumption and dynamic performance ," IEEE, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010, 1-6.

[4] Fang L., Qin S., Xu G., Li T. and Zhu K., " Simultaneous Optimization for Hybrid Electric Vehicle Parameters Based on Multi-Objective Genetic Algorithms," Energies, 2011, 4, 532-544.

[۵] مهران مازندرانی، مهران رفیعی، جلال شجاعی و علی وحیدیان کامیاد، "کنترل خودروهای هیبرید موازی با رویکردی به منطق فازی، نخستین کنفرانس ملی انرژی، فناوری های خودرو، توسعه پایدار با رویکرد توسعه فناوری خودروهای هیبریدی و الکتریکی," تهران، ۱۳۹۰

[6] Sciarretta A., Back M. and Guzzella L., " Optimal control of parallel hybrid electric vehicles ," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12, 352-363.

[7] Delprat S., Lauber J., Guerra T. M. and Rimaux J., " Control of a parallel hybrid powertrain :optimal control ," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53, 872-881.

[8] Vasudevan M., Arumugam R. and Paramasivam S., " Modelling and simulation of a hybrid vehicle using direct torque control of induction motor ," International Journal of Modelling and Simulation, 2007, 27, 80-88.

[۹] یوسف مقدس، مهدی میرزایی و سیامک حسین پور, " کاهش مصرف سوخت و آلایندگی در خودرو پراید با انتخاب استراتژی کنترل هیبریدی," ششمین همایش ملی مهندسی محیط زیست تهران، ۱۳۹۱.

[10] Montazeri-Gh M., Poursamad A. and Ghalichi B., " Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles ," Journal of the Franklin Institute, 2006, 343, 420-435.

[11] B. Huang, Z. Wang, and Y. Xu, "Multi-objective genetic algorithm for hybrid electric vehicle parameter optimization," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, 2006, pp. 5177-5182

[12] Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., O'Keefe M., Sprik S. and Wipke K., " ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling, Journal of Power Sources," 2002, 110, 255-266.

[13] Montazeri-Gh M. and Naghizadeh M., " Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy," in Proceedings of 15th European Simulation Symposium, 2003.

[14] Johnson V. H., Wipke K. B. and Rausen D. J., " HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions," SAE transactions, 2000, 109, 1677-1690.

[15] http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-05-17]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1392.1.2.2.0]