

بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم کنترلی خودروی هیبرید موازی مجهز به CVT تمام‌چنبره به کمک الگوریتم گروهی پرندگان

مجتبی دلخوش (دانشجوی دکتری)

محمود سعادت‌فومنی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (پهار ۱۳۹۴)
دوری ۳ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۲۱-۱۵

هدف این تحقیق «بهینه‌سازی الگوریتم کنترلی خودروی هیبرید موازی مجهز به سیستم انتقال قدرت پیوسته (CVT) تمام‌چنبره» در چرخه‌ی رانندگی $SC^{\circ}3$ است. برای این منظور، ابتدا اثرات کیفی استفاده از CVT به جای گیربکس معمولی در مصرف سوخت خودرو بیان می‌شود. سپس الگوریتم محاسبه‌ی مصرف سوخت خودروی مجهز به این سیستم ارائه می‌شود. در ادامه، یک الگوریتم کنترلی ویرایش شده برای خودروی هیبرید موازی ارائه می‌شود. در نهایت، پارامترهای کنترل‌کننده به کمک الگوریتم گروهی پرندگان با هدف کاهش مصرف سوخت این خودرو در چرخه‌ی رانندگی و کاهش حجم و وزن باتری مورد نیاز آن بهینه می‌شود. مشاهده می‌شود که به ازای استفاده از الگوریتم کنترلی بهینه شده و سیستم انتقال قدرت CVT، مصرف سوخت خودروی هیبریدی در چرخه‌ی $SC^{\circ}3$ ۳۵٪ کم‌تر از مقدار آن در حالت استفاده از گیربکس پنج‌سرعته و الگوریتم کنترلی غیربهینه خواهد شد. همچنین، مقدار کاهش مصرف سوخت نسبت به حالت استفاده از CVT و الگوریتم کنترلی غیربهینه معادل ۵ درصد است.

واژگان کلیدی: خودروی هیبرید موازی، سیستم انتقال قدرت، نسبت تبدیل پیوسته، الگوریتم کنترلی، چرخه‌ی رانندگی، بهینه‌سازی چندهدفه.

m_delkhosh@mech.sharif.edu
m.saadat@sharif.ir

۱. مقدمه

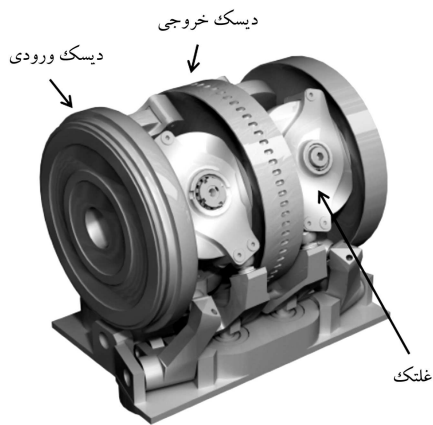
نیاز خودرو است.^[۱] در خودروهای هیبرید موازی این مشکل وجود ندارد. در این خودروها، موتور احتراقی و الکتریکی مستقیماً به چرخ‌ها متصل‌اند؛ در نتیجه قسمتی از توان لازم توسط موتور الکتریکی و قسمتی توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود که نیاز به موتور الکتریکی با توان بالا (و در نتیجه حجم بالا) را رفع می‌کند. اما عیب اصلی این خودروها، اتصال مستقیم موتور احتراقی به چرخ‌ها و عدم کارکرد در دور بهینه است.^[۲] یکی از روش‌های رفع این مشکل، استفاده از سیستم انتقال قدرت پیوسته (CVT) بین موتور احتراقی و چرخ‌هاست. این مجموعه به موتور احتراقی اجازه می‌دهد تا در هر لحظه، در دور موتور مربوط به FC بهینه قرار گیرد. به جای انتخاب یک دنده بین ۴ یا ۵ دنده، CVT یک نسبت تبدیل پیوسته را ارائه می‌دهد. مشاهده شده است که در حالت استفاده از این سیستم‌های انتقال قدرت، FC ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.^[۳]

فعالیت‌های بسیاری در زمینه‌ی بررسی خودروهای هیبرید موازی انجام شده است. در این راستا، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی FC و آلاینده‌ی خودرو هیبرید موازی در چرخه‌های رانندگی مختلف استفاده شده است.^[۴] در بررسی‌هایی نیز الگوریتم فازی استراتژی کنترل توان خودرو هیبرید موازی ارائه شد^[۵] و همچنین، فرایند بهینه‌سازی خودرو هیبرید موازی به کمک بهینه‌سازی تمامی قسمت‌های آن

پس از یک قرن تحقیق و توسعه در زمینه‌ی بهینه‌کردن خودروها، محققین همچنان به دنبال راه‌هایی برای افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت (FC) آن‌ها هستند. تا همین اواخر، از خودروهای الکتریکی به عنوان راه حلی برای مشکل FC یاد می‌شد؛ اما با توجه به توسعه‌ی محدود و ناکافی باتری‌ها به عنوان منابع تأمین‌کننده‌ی انرژی، محققین به سمت راه‌حل‌های دیگری متمایل شدند. یکی از فعالیت‌های انجام شده در این زمینه توسعه‌ی خودروهای هیبریدی است که یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در زمینه‌ی خودرو در دهه‌های اخیر است. در خودروهای هیبریدی از مزایای هر دو خودرو الکتریکی و خودروی مجهز به موتور احتراقی استفاده می‌شود.^[۱] خودروهای هیبریدی انواع مختلفی دارند، اما دو نوع مهم این خودرو عبارت‌اند از: خودروهای هیبرید سری و خودروهای هیبرید موازی. در نوع سری، موتور مستقیماً به چرخ‌ها متصل نیست و انرژی از طریق باتری و موتور الکتریکی به چرخ‌ها انتقال می‌یابد. در نتیجه، موتور احتراقی می‌تواند در دور موتور مربوط به FC بهینه کار کند. اما مشکل این خودروها نیاز به موتور الکتریکی حجیم برای تولید بیشترین توان مورد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۱۳، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۲۰.



شکل ۲. سیستم انتقال قدرت CVT تمام چنبره. [۱۰]

انجام گرفت. در مطالعات دیگری همین فعالیت با هدف کاهش میزان آلایندگی این خودروها انجام شد. [۷] محققین یک بهینه‌سازی چند هدفه بر نحوه توزیع توان در یک خودرو هیبریدموازی به همراه گیربکس CVT انجام داده‌اند. [۸]

فعالیت‌هایی نیز برای بررسی FC خودروی مجهز به سیستم انتقال قدرت CVT انجام، و الگوریتم کنترل CVT برای دست‌یابی به FC کمینه در شرایط گذرا ارائه شد. [۹]

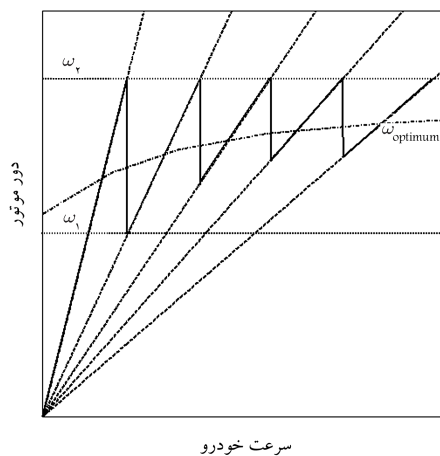
در این تحقیق، هدف معرفی و بهینه‌سازی یک الگوریتم کنترلی برای خودروی هیبریدی مجهز به سیستم انتقال قدرت پیوسته است. برای این منظور، ابتدا الگوریتم محاسبه‌ی مصرف سوخت خودروی مجهز به این سیستم انتقال قدرت معرفی می‌شود. در ادامه، الگوریتم کنترل خودروی هیبریدموازی معرفی، و در نهایت پارامترهای کنترلی با هدف کاهش مصرف سوخت و حجم باتری مورد نیاز آن بهینه‌سازی می‌شود.

۲. سیستم انتقال قدرت پیوسته

سیستم انتقال قدرت پیوسته از مزایای فراوانی برخوردار است. یکی از مزایای این مجموعه این است که به کمک آن می‌توان از موتور خودرو در دور مربوط به FC کمینه استفاده کرد. در شکل ۱ نمودار شماتیک تغییرات دور موتور خودرو مجهز به گیربکس پنج‌سرعته، برحسب سرعت خودرو نشان داده شده است.

در این شکل، FC خودرو در بازه دور موتور $[\omega_1, \omega_2]$ عدد کوچکی است. اما کم‌ترین مقدار FC در $\omega_{optimum}$ اتفاق می‌افتد. در صورت استفاده از سیستم انتقال قدرت CVT، می‌توان دور موتور را در مقدار $\omega_{optimum}$ ثابت نگه داشت و نسبت تبدیل را در سرعت‌های مختلف به کمک CVT تغییر داد.

نوع چنبره‌ی ۱ یکی از انواع سیستم انتقال قدرت CVT است. این نوع از CVT را می‌توان به دو نوع نصف چنبره و تمام‌چنبره تقسیم کرد. در شکل ۲ شماتیک CVT تمام چنبره نشان داده شده است. در این شکل، مجموعه از ۳ دیسک و ۶ غلنک تشکیل شده که این غلنک‌ها به کمک بازوهای دوران می‌کند. با دوران دیسک‌های ورودی و تماس بین دیسک‌ها و غلنک‌ها، حرکت به غلنک‌ها منتقل شده و به همین ترتیب حرکت به دیسک خروجی منتقل می‌شود.



شکل ۱. نمودار تغییرات دور موتور برحسب سرعت خودرو در دنده‌های مختلف.

۳. الگوریتم محاسبه‌ی مصرف سوخت خودروی مجهز به

CVT

برای ارائه‌ی الگوریتم FC، باید یک چرخه‌ی رانندگی برای خودرو در نظر گرفت. در این مقاله چرخه‌ی در نظر گرفته شده برای این منظور، چرخه‌ی $3^{\circ} SC$ است که در آن مقدار مسافت طی شده در هر چرخه معادل ۵٫۷۶ km است.

برای محاسبه‌ی FC خودرو ابتدا باید مورد نیاز موتور را تعیین کرد. نیرو و توان مورد نیاز در سر چرخ خودرو و توان مورد نیاز موتور در هر لحظه از چرخه به ترتیب از رابطه‌های ۱ تا ۳ به دست می‌آید: [۱۱]

$$F_t = f_r mg + \frac{1}{4} \rho_{air} C_D A v^2 + m_r a \quad (1)$$

$$P_t = F_t v \quad (2)$$

$$P_{req} = \frac{P_t}{\eta_t \eta_d} \quad (3)$$

که در آن مقدار m_r از رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه است: [۱۱]

$$m_r = m [1.7 \times 10^{-4} + 0.7 \times 10^{-2} \Delta(n a n_t)] \quad (4)$$

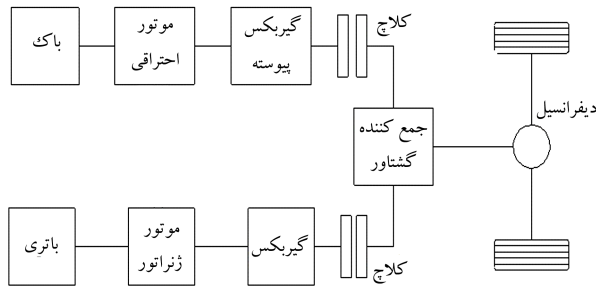
در طول چرخه، با توجه به توان مورد نیاز موتور و با داشتن کانتورهای FC مربوط به خودرو، دور موتور مربوط به کم‌ترین FC انتخاب، و از این طریق دور موتور و توان آن، گشتاور ورودی به گیربکس تعیین می‌شود. به کمک رابطه‌ی ۵ نسبت تبدیل مورد نیاز گیربکس در هر لحظه تعیین می‌شود:

$$n_t = \frac{\text{gearbox input rpm}}{\text{gearbox output rpm}} = \frac{\omega_1}{\frac{v n_d}{R_d}} \quad (5)$$

FC در کل چرخه برحسب لیتر بر 10^3 کیلومتر، و مطابق رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$Q = \left(\sum \frac{FC_i(\omega_i, P_{req_i})}{3600 \rho_{fuel}} \Delta t_i \right) \frac{10^3}{5.76} \quad (6)$$

که در آن، FC_i از روی کانتورهای مصرف سوخت مربوط به خودرو (شکل ۳) به دست می‌آید. این الگوریتم برای محاسبه‌ی FC بر مبنای استفاده از CVT به عنوان سیستم انتقال قدرت است که به کمک آن، دور موتور مستقل از سرعت خودرو است. مشخصات خودرو مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، n_{t_i} نسبت



شکل ۴. شماتیک خودروی هیبرید موازی.

جدول ۲. مقادیر بازده و توان قسمت‌های اضافه شده به خودروی مورد نظر و مقادیر پارامترهای معرفی شده در الگوریتم کنترلی. [۱۷-۱۵]

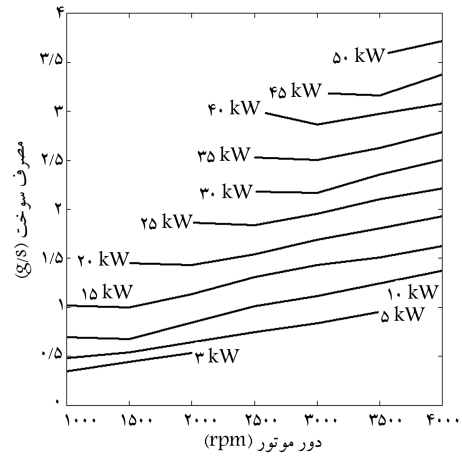
۱۵ kW	P_M	۲۰۰ kJ	ظرفیت باتری ($E_{B \max}$)
٪۷۰	η_{Gen}	٪۹۰	η_M
٪۷۵	η_{rb}	٪۹۰	η_{SR}
۲٫۲ kW	$P_{E \min}$	٪۹۵	η_{TC}
۲ m/s	V_L	۰٫۱	t_{off}
۰٫۹	H_{SOC}	۰٫۱	L_{SOC}
۰٫۷۵	η_{rb}	۰٫۵	Initial SOC

در این الگوریتم شارژ باتری در دو حالت انجام می‌شود. یکی در لحظات ترمزگیری به کمک ترمز باز یاب (حالت الف)، و دیگری در لحظاتی که توان مورد نیاز خودرو کم‌تر از $P_{E \min}$ است و سرعت خودرو از حدی (V_L) بیشتر است و علاقه مندییم موتور در کم‌ترین توان بهینه‌ی خود کار کند و اختلاف این توان با توان مورد نیاز، به کمک موتور الکتریکی (در حالت ژنراتوری) صرف شارژ باتری شود (حالت ب). اگر توان مورد نیاز خودرو کم‌تر از $t_{off} \times P_{E \max}$ یا سرعت خودرو کم‌تر از V_L باشد، حالت مطلوب تأمین توان خودرو به کمک باتری و موتور الکتریکی است. از طرفی مایلیم SOC بین کران بالا و پایین مجاز خود تغییر کند. همچنین در لحظاتی که خودرو ساکن است موتور الکتریکی و احتراقی خاموش است. در الگوریتم معرفی شده، مانند الگوریتم BCS، موتور احتراقی تأمین‌کننده‌ی اصلی توان است و در مواقع ضروری موتور الکتریکی به کمک آن می‌آید. بنابراین در لحظاتی که نیاز به توانی بیشتر از توان موتور احتراقی است، موتور الکتریکی نیز توان اضافی مورد نیاز را تأمین می‌کند. برای جلوگیری از پیچیده‌تر شدن فلوچارت کنترلی، این قانون در فلوچارت نشان داده نشده است.

برای پیاده‌کردن الگوریتم کنترلی، دسترسی به مدل قسمت‌های مختلف خودرو ضروری است. برای تعیین بازده CVT مورد استفاده از مدل ارائه شده توسط محققین [۱۴] استفاده می‌شود. مطابق این مدل، بازده این سیستم انتقال قدرت تابعی از هندسه‌ی آن و شرایط کاری -- از جمله گشتاور و دور ورودی و نسبت تبدیل آن -- است.

باتری مورد استفاده از نوع لیتیوم - یون پلیمر است که دارای امپدانس داخلی ۱۵ mΩ، ولتاژ نامی ۱۴٫۸ ولت، و ظرفیت ۱۰ آمپر ساعت است. با توجه به مقدار پایین امپدانس این باتری، بازده آن در طول فرایند شارژ و دشارژ تغییر چندانی نمی‌کند. با در نظر گرفتن داده‌های باتری، بازده آن مقداری ثابت و برابر ۹۸٪ در نظر گرفته می‌شود.

در جدول ۲ مقادیر بازده و توان دیگر قسمت‌های خودروی هیبریدی و مقادیر پارامترهای معرفی شده در الگوریتم کنترلی ارائه شده است. به کمک این



شکل ۳. نمودار مقدار FC بر حسب دور موتور به ازای مقادیر مختلف توان موتور. [۱۲]

جدول ۱. مشخصات خودرو مورد نظر. [۱۲]

۱٫۲۳ kg/m ^۳	ρ_{air}	۰٫۰۱۳	f_r
۱۳۰۰ kg	m	۰٫۳۲۵	C_D
۰٫۳۱۰۸ m	R_d	۲٫۲۶ m ^۲	A
۷۱۹٫۷ kg/m ^۳	ρ_{fuel}	۲٫۲ kW	$P_{E \min}$
٪۹۰	η_d	۴٫۵۲۹	n_d
۱٫۸۵	n_{t2}	۳٫۴۶	n_{t1}
۰٫۹۷	n_{t4}	۱٫۲۸	n_{t3}
۳۵۰۰ rpm	ω_2	۰٫۷۴	n_{t5}
۴۰۰۰ rpm	ω_4	۴۰۰۰ rpm	ω_2
		۴۵۰۰ rpm	ω_5

تبدیل گیربکس خودرو است. همچنین ω_i دور موتور خودرو به هنگام تعویض دنده ۱ - i به دنده نام است.

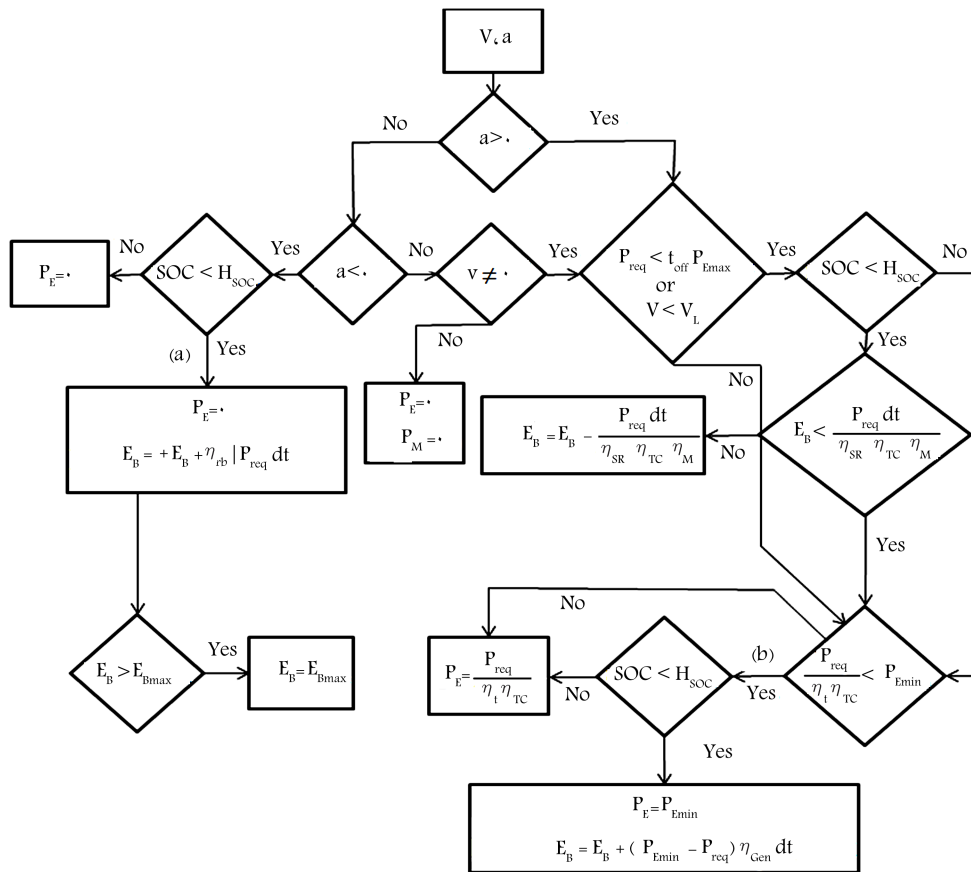
مقدار FC ارائه شده توسط سازنده برای چرخه‌ی $SC^{0.3}$ برابر ۹٫۵ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر است. مقدار FC به کمک این مدل، برای خودرو مورد نظر با گیربکس پنج‌سرعتی برابر ۹٫۵۷ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر است. [۱۲] خطای مدل برابر ۱٪ است و در نتیجه، مدل محاسبه‌ی FC قابل قبول است.

۴. الگوریتم کنترلی خودروی هیبرید موازی

در این قسمت، هدف تبدیل خودروی مورد نظر به یک خودرو هیبرید موازی است. در شکل ۴ شمایی از این خودرو نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود، خودروی مورد نظر از یک موتور احتراقی، دو گیربکس معمولی و پیوسته، باتری، موتور/ژنراتور، جمع‌کننده‌ی گشتاور و دو کلاچ معمولی تشکیل شده است. در این ساختار، موتور الکتریکی قابل تبدیل به ژنراتور در حالت شارژ باتری است.

الگوریتم کنترل قسمت‌های مختلف این خودرو، یک مدل بهبود یافته‌ی کنترل پایه (BSC) [۱۳] است. در شکل ۵ فلوچارت این الگوریتم نشان داده شده است. در این الگوریتم، پارامترهای کنترلی عبارتند از L_{SOC} ، H_{SOC} ، t_{off} و $E_{B \max}$.



شکل ۵. فلوجارت کنترلی خودروی هیبرید موازی.

یکی از روش‌های متداول برای بهینه‌سازی توابع هدف چندگانه به‌کارگیری تابعی از ترکیب خطی موزون آنهاست که به دلایل مختلف -- از جمله مشکلات مربوط به نحوه‌ی نرمال کردن توابع و تغییرات ضرایب وزنی در نقاط مختلف فضای کاری -- در این پژوهش به کارگرفته نشده و از روشی مشابه با روش PSI استفاده شده است. براساس این متد برای ظرفیت باتری یک مقدار مجاز به‌عنوان قید در نظر گرفته شده و مسئله‌ی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن FC به‌عنوان تابع هدف حل می‌شود. سپس مقدار قید اعمال شده بر ظرفیت باتری افزایش یافته و با تکرار این روند، منحنی FC بهینه براساس مقادیر مختلف ظرفیت باتری رسم می‌شود.^[۱۸]

برای بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی تغییرات جزئی (PSO)^۳ استفاده می‌شود.^[۱۹] در این الگوریتم، تابع تبدیل همان مدل استفاده شده برای محاسبه‌ی FC خودروی هیبرید موازی مجهز به گیربکس CVT تمام‌چنبره است. حدود تغییرات پارامترهای بهینه‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول، بازه تغییرات L_{SOC} و H_{SOC} با توجه به داده‌های سازنده تعیین شده است.

جدول ۳. حدود تغییرات پارامترهای بهینه‌سازی.^[۲۰]

V_L (m/s)	t_{off}	H_{SOC}	L_{SOC}	ظرفیت باتری (kJ)
[۱۲ - ۲]	[۰٫۶ - ۰٫۱]	[۰٫۹ - ۰٫۶]	[۰٫۳ - ۰٫۱]	[۵۰۰ - ۵]

الگوریتم و به‌ازای مشخصات خودروی مورد نظر با گیربکس پنج‌سرعتی معمولی (جدول‌های ۱ و ۲)، مقدار FC در چرخه‌ی رانندگی $SC_{0.3}$ برابر ۶٫۶۷ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر است. در حالی که مقدار FC خودروی مورد نظر در حالت غیر هیبریدی برابر ۹٫۵ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر است. در نتیجه، FC خودروی هیبریدی در چرخه‌ی $SC_{0.3}$ حدود ۳۰٪ کم‌تر است.

۵. بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی خودرو هیبرید موازی

همان‌طور که اشاره شد، یکی از اصلی‌ترین اهداف استفاده از خودروهای هیبریدی کاهش مصرف انرژی است. با توجه به وابستگی مصرف سوخت خودروی هیبریدی به پارامترهای کنترلی آن، به نظر می‌رسد با بهینه‌سازی این پارامترها بتوان مصرف سوخت را تا حد ممکن کاهش داد. از طرفی، کمینه‌کردن حجم تجهیزات اضافه شده به خودروی معمولی برای تبدیل آن به خودروی هیبریدی یکی از دغدغه‌های محققین است. یکی از مهم‌ترین اجزای خودروی هیبریدی که حجم بالایی از این تجهیزات را به خود اختصاص می‌دهد، باتری است. بنابراین در این مقاله هدف کاهش FC خودرو و کمینه‌کردن حجم باتری است. برای یک باتری خاص، حجم باتری متناسب با ظرفیت آن است. بنابراین، در این مقاله دومین هدف از بهینه‌سازی کاهش ظرفیت مورد نیاز باتری است.

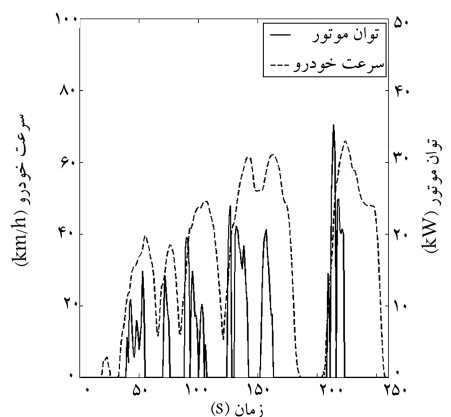
در جدول ۴ مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترلی، FC، ظرفیت باتری و مقدار SOC در انتهای چرخه به‌زای این پارامترها ارائه شده است. مطابق جدول ۴، مقدار SOC در انتهای چرخه برابر مقدار اولیه‌ی آن است که قید مربوط به بهینه‌سازی را ارضا می‌کند.

در شکل ۸ نمودار تغییرات سرعت خودرو و توان موتور در بخشی از چرخه‌ی $SC^{\circ}3$ نشان داده شده است. مطابق شکل، تغییرات توان موتور احتراقی طی چرخه زیاد است. در طول یک چرخه (۶۰۰ ثانیه) مدت ۴۱۰ ثانیه موتور احتراقی خاموش است. علت این امر کم‌بودن توان مورد نیاز خودرو در این لحظات و قابلیت تأمین آن از طریق باتری است. مطابق شکل، در سرعت‌ها و شتاب‌های بالا (شیب بالای نمودار سرعت - زمان) توان موتور احتراقی صفر نیست که علت آن عدم توانایی باتری برای تأمین توان مورد نیاز است.

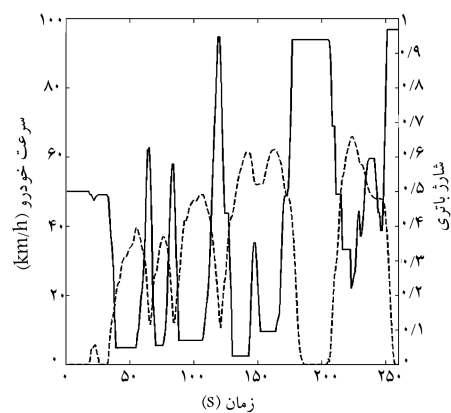
در شکل ۹ نیز نمودار تغییرات شارژ باتری در بخشی از چرخه نشان داده شده است. بر این اساس، نوسانات شارژ باتری زیاد است و در نهایت به مقدار اولیه‌ی خود بازمی‌گردد.

جدول ۴. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترلی، مقدار SOC در انتهای چرخه، ظرفیت باتری و (FC).

FC	ظرفیت باتری	Final SOC	V_L	t_{off}	H_{SOC}	L_{SOC}
(L/۱۰۰km)	(kJ)		(m/s)			
۴,۳۴	۹۰	۰,۵	۳	۰,۶	۰,۹	۰,۱



شکل ۸. نمودار تغییرات سرعت خودرو و توان موتور طی بخشی از چرخه‌ی $SC^{\circ}3$.



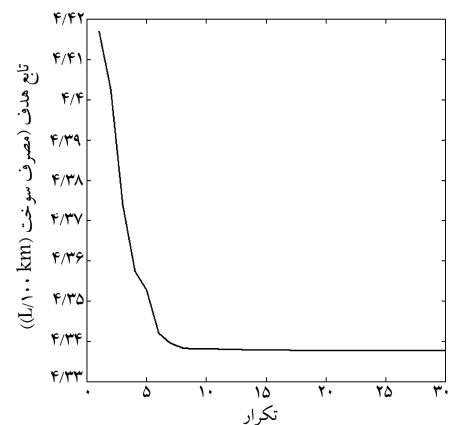
شکل ۹. نمودار تغییرات شارژ باتری طی بخشی از چرخه‌ی $SC^{\circ}3$.

در این بهینه‌سازی یک قید وجود دارد، به این ترتیب که SOC باتری در انتهای چرخه نباید کم‌تر از مقدار آن در ابتدای چرخه باشد. دلیل وجود این قید آن است که در صورت کاهش شارژ باتری در یک چرخه، طی چند چرخه شارژ آن به صفر می‌رسد که پدیده‌ی مطلوبی نیست. [۲۲] همچنین بدین معناست که باتری یک منبع موقت تأمین انرژی است. [۲۳]

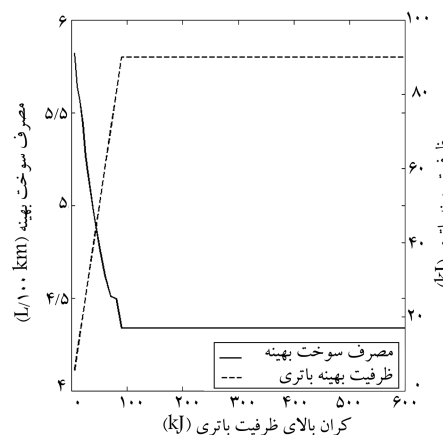
۶. نتایج بهینه‌سازی

در شکل ۶ تغییرات تابع هدف (FC) طی فرایند بهینه‌سازی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در پله‌ی ۱۰ تابع هدف همگرا شده و در پله‌های بعدی تغییر محسوسی در تابع هدف رخ نمی‌دهد.

در شکل ۷ نمودار تغییرات FC بهینه و نسبت ظرفیت باتری بهینه برحسب کران بالای ظرفیت باتری نشان داده شده است. بر این اساس، با افزایش کران بالای ظرفیت باتری بر مقدار بهینه‌ی ظرفیت باتری افزوده می‌شود و مقدار بهینه‌ی مصرف سوخت کاهش می‌یابد. اما به‌زای کران بالای ظرفیت باتری مساوی ۹۰، مقدار بهینه‌ی مصرف سوخت و ظرفیت باتری ثابت می‌ماند. این بدان معناست که نقطه‌ی بهینه‌ی ظرفیت باتری ۹۰ است و در صورت استفاده از باتری با ظرفیت بیشتر، مقدار مصرف سوخت در این چرخه کاهش نمی‌یابد.



شکل ۶. نمودار تغییرات تابع هدف طی فرایند بهینه‌سازی.



شکل ۷. نمودار تغییرات FC بهینه و نسبت ظرفیت باتری بهینه برحسب کران بالای ظرفیت باتری.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، پس از ارائه‌ی مدل محاسباتی مصرف سوخت مجهز به CVT، مدل کنترل قسمت‌های مختلف خودروی هیبرید موازی ارائه شد. در ادامه نیز بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی با هدف کمینه‌کردن مصرف سوخت خودرو و حجم باتری مورد نیاز انجام شد. به‌منظور بهینه‌سازی دودفده، برای حجم باتری یک کران بالا در نظر گرفته شد و پارامترهای کنترلی و حجم بهینه‌ی باتری به دست آمد. با افزایش کران بالای باتری، بهینه‌سازی انجام، و مشاهده شد که به‌ازای کران بیشتر از kJ ۹۰، تغییری در پارامترهای کنترلی و ظرفیت بهینه‌ی باتری اتفاق نمی‌افتد. در نتیجه، مقدار بهینه‌ی پارامترهای بهینه‌سازی برابر مقدار آن‌ها به‌ازای کران بالای kJ ۹۰ برای ظرفیت باتری است. این روش یکی از روش‌های بهینه‌سازی دودفده است. همچنین به‌ازای حالت بهینه‌ی کنترل‌کننده، مقدار مصرف سوخت نسبت به خودروی هیبرید مجهز به گیربکس پنج‌سرعته ۳۵٪ کم‌تر خواهد بود که کاهش چشمگیری است. باید توجه داشت که نتایج بهینه‌سازی برای چرخه‌ی رانندگی SC۰۳ معتبر است و برای دیگر چرخه‌های موجود، باید بهینه‌سازی مجدد انجام شود. کاهش چشمگیر مصرف سوخت خودرو ناشی از بهینه‌سازی، نشان می‌دهد که مصرف سوخت خودروی هیبریدی به‌شدت به پارامترهای کنترلی و حجم باتری آن وابسته است. بنابراین تعیین دقیق این پارامترها یکی از موارد مهم در طراحی خودروی هیبریدی است.

فهرست علائم

FC: مصرف سوخت

A: مساحت تصویر شده از روبه‌روی خودرو

CVT: سیستم انتقال قدرت پیوسته

v: سرعت خودرو

f_r : ضریب مقاومت غلتشی

a: شتاب خطی خودرو

m: جرم خودرو

η_t : بازده گیربکس خودرو

ρ : چگالی

n_t : نسبت تبدیل گیربکس

CD: ضریب مقاومت باد

n_d : نسبت تبدیل دیفرانسیل

m_r : جرم دینامیکی خودرو

η_d : بازده دیفرانسیل خودرو

ω_1 : دور ورودی گیربکس

ICE: موتور احتراقی

Rd: شعاع چرخ خودرو

GB: گیربکس

F_t : نیروی کششی سر چرخ خودرو

MG: موتور / ژنراتور

P_t : توان مورد نیاز سر چرخ خودرو

CL: کلاچ

Batt: باتری

P_{Emin} : توان کمینه بهینه موتور

TC: جمع‌کننده‌ی گشتاور

V_L : سرعت حد خودرو

H_{SOC} : کران بالای مجاز شارژ باتری

SOC: شارژ باتری

L_{SOC} : کران پایین مجاز شارژ باتری

η_{Gen} : بازده موتور الکتریکی در حالت ژنراتوری

t_{off} : آستانه توان

η_{rb} : درصد جذب انرژی ترمزی به‌کمک ترمز باز یاب

E_B : انرژی باتری

η_M : بازده موتور الکتریکی

E_{Bmax} : مقدار ظرفیت باتری

η_{SR} : بازده گیربکس

P_{req} : توان مورد نیاز موتور

η_{TC} : بازده جمع‌کننده‌ی گشتاور

P_M : توان موتور الکتریکی

P_E : توان موتور احتراقی

پانوشته‌ها

1. toroidal
2. baseline control strategy
3. particle swarm optimization

منابع (References)

1. Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A., *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals,*

Theory, and Design, Second Edition, CRC Press (2009).

2. Fajri P. and Asaei, B. "Plug-in hybrid conversion of a series hybrid electric vehicle and simulation comparison", *Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM 2008. 11th International Conference on*, pp. 287-292 (2008).
3. Amjad, S., Neelakrishnan, S. and Rudramoorthy, R. "Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1104-1110 (2010).

4. Carbone, G., Mangialardi, L. and Mantriota, G. "Fuel consumption of a mid class vehicle with infinitely variable transmission", Warrendale, PA: SAE International (2001).
5. 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*, **343**, pp. 420-435 (2006).
6. Schouten, N.J., Salman, M.A. and Kheir, N.A. "Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic", *Control Engineering Practice*, **11**, pp. 171-177 (2003).
7. Kheir, N.A., Salman, M.A. and Schouten, N.J. "Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic", *Mathematics and Computers in Simulation*, **66**, pp. 155-172 (2004).
8. Won, J.S., Langari, R. and Ehsani, M. "An energy management and charge sustaining strategy for a parallel hybrid vehicle with CVT", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, **13**, pp. 313-320 (2005).
9. Pfiffner, R., Guzzella, L. and Onder, C.H. "Fuel-optimal control of CVT powertrains", *Control Engineering Practice*, **11**, pp. 329-336 (2003).
10. Newall, J.P., Cowperthwaite, S., Hough, M. and Lee, A.P. "Efficiency modelling in the full toroidal variator: Investigation into optimization of EHL contact conditions to maximize contact efficiency", International Continuously Variable and Hybrid Transmission Congress, pp. 23-25 (2004).
11. Gillespie, T.D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Published by: Society of Automotive Engineers (1992).
12. Iran Khodro Website. [Online]. Available: <http://www.ikco.com/fa/>.
13. Johnson, V.H., Wipke, K.B. and Rausen, D.J. "HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions", *Proc. of the Future Car Cong.*, SAE Paper No. 2000-01-1543 (2000).
14. Delkhosh M. and Foumani, M.S. "Optimisation of full-toroidal continuously variable transmission in conjunction with fixed ratio mechanism using particle swarm optimisation", *Vehicle System Dynamics*, **51**, pp. 671-683 (2013).
15. del Castillo, J.M. "The analytical expression of the efficiency of planetary gear trains", *Mechanism and Machine Theory*, **37**, pp. 197-214 (2002).
16. Van Sterkenburg, S., Rietveld, E., Rieck, F. and Veenhuizen, B. "Analysis of regenerative braking efficiency, A case study of two electric vehicles operating in the Rotterdam area", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, pp. 1-6 (Sep. 2011).
17. <http://gitabattery.com/>.
18. Statnikov, R.B., *Multicriteria Design: Optimization and Identification*, Springer Netherlands (1999).
19. Delkhosh, M., Foumani, M.S., Boroushaki, M., Ekhtiari, M. and Dehghani, M. "Geometrical optimization of half toroidal continuously variable transmission using particle swarm optimization", *Scientia Iranica*, (Sep. 2011).
20. Zheng, C.H., Park, Y.I., Lim, W.S. and Cha, S.W. "Fuel consumption of fuel cell hybrid vehicles considering battery SOC differences", *International Journal of Automotive Technology*, **13**, pp. 979-985 (2012).
21. Park, J. and Park, J.-H. "Development of equivalent fuel consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles", *International Journal of Automotive Technology*, **13**, pp. 835-843 (2012).
22. Dorri, M. and Shamekhi, A.H. "Design and optimization of a new control strategy in a parallel hybrid electric vehicle in order to improve fuel economy", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **225**, pp. 747-759 (Jun. 2011).
23. Boukehili, A., Zhang, Y.T., Zhao, Q., Ni, C.Q., Su, H.F. and Huang, G.J. "Hybrid vehicle power management modeling and refinement", *International Journal of Automotive Technology*, **13**, pp. 987-998 (2012).