فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

شبیه سازی و طراحی یک خودروی دورگهٔ برقی به منظور افزایش بازده و کاهش آلایندگی

فتح الله امی[۱]، سعید سوری[۲*]، الیاس رستمی[۳]

[۱] دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، fommi@modares.ac.ir
[۲] دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، saeedsouri@gmail.com
[۳] دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، elyas.rostami@yahoo.com
[*] نویسندهٔ مسئول، شمارهٔ تماس: ۰۹۱۲۷۷۷۲۲۰۸

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون مصرف سوخت‌های سنگواره‌ای و آلایندگی ناشی از آنها، خودروهای دورگه، کارآمدترین راه‌حل میان مدت برای کاهش معضلات ناشی از آلودگی محیط زیست و افزایش مواد سوختی است. در این پژوهش شبیه‌سازی خودروی ۲۰۶ در نرم‌افزار ADVISOR انجام می‌شود و پس از صحت سنجی شبیه‌سازی، سامانهٔ دورگه در خودرو پژو ۲۰۶ بررسی می‌شود. پس از بررسی متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد خودروی دورگه، از روش گروهی ذرات (PSO) برای بهینه‌یابی متغیرهای تأثیر گذار استفاده می‌شود. این کار برای دست‌یابی به کمترین مقدار مصرف سوخت ضمن حفظ عملکرد دینامیکی خودرو است. در نهایت کاهش مصرف سوخت در خودروی دورگهٔ بهینه شده حدود ۱۶٪ و در صورت استفاده از برق شهر برای پرکردن قوه، در ۱۲ کیلومتر ابتدایی مسیر حدود ۴۰٪ کاهش مقدار مصرف سوخت را به همراه خواهد داشت. در صورتی که علاوه بر قوای محرکهٔ سامانهٔ دورگه، بخش نسبت تبدیل‌های جعبه‌دنده نیز بهینه‌سازی شود می‌توان به ۵٪ کاهش مصرف سوخت بیشتر یعنی ۲۱٪ کاهش مصرف سوخت دست یافت.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:
دریافت: ۳۰ بهمن ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۴ تیر ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:
خودروی دورگهٔ برقی
نرم افزار ADVISOR
خودروی ۲۰۶
افزایش بازده
کاهش آلایندگی

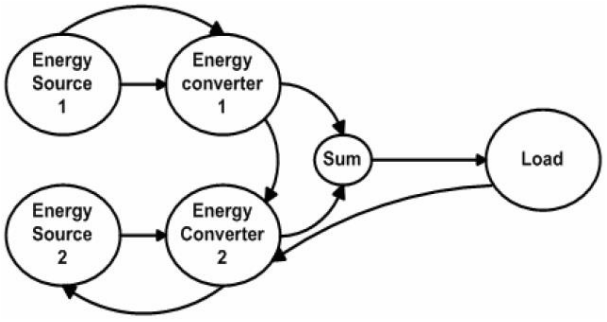
۱- مقدمه

یکی از صنایعی که همواره مورد توجه متخصصین و صنعت‌کاران بوده است، صنعت حمل و نقل و ترابری است. دانشمندان همواره در این تلاش بوده اند تا خودروهایی تولید کنند که نسبت به خودروهای معمول، عملکرد بهتر، مصرف سوخت پایین تر و آلودگی کمتری داشته باشند.

منظور از خودروی دورگه، خودرویی است که از دو یا چند منبع تولید انرژی و مبدل انرژی برای تولید قدرت استفاده می‌کند. این دو منبع انرژی می‌توانند از هر نوعی باشند، اما معمول ترین آنها، قوه و پیل سوختی است. مبدل‌های رایجی که امروزه در خودروهای دورگه استفاده می‌شوند، موتورهای برقی و احتراق داخلی اند. خودروهای دورگه این امکان را فراهم می‌کنند که از مزایای هر دو نوع خودروهای برقی و احتراقی استفاده شود. بدین طریق، می‌توان خودرویی با آلودگی ناچیز و قدرت شتاب گیری مناسب طراحی نمود. اما از طرفی، در خودروهای دورگه دو منبع انرژی داریم و پایش و تنظیم همزمان این دو منبع دشوار است. نحوهٔ بکارگیری و پایش و تنظیم این دو منبع، عواملی چون مقدار مصرف سوخت، مقدار آلودگی و مقدار نگهداری تقویت قوه‌های خودرو را تعیین می‌کند.

۲- خودروهای دورگهٔ برقی

همانطور که قبلاً عنوان شد، خودروی دورگه خودرویی است که از دو یا چند منبع انرژی و مبدل انرژی برای تولید قدرت استفاده می‌کند. اگر یکی از این منابع انرژی یک منبع برقی (به عنوان مثال قوه) باشد، یک خودروی دورگهٔ برقی خواهیم داشت. عموماً در خودروهای دورگه جدید از دو منبع و مبدل انرژی بهره گرفته می‌شود که یکی از آنها برقی است. به طور کلی می‌توان ساختار خودروهای دورگه را به صورت شکل ۱ معرفی کرد.



شکل ۱: ساختار کلی خودروهای دورگه [۳]

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود دو سامانهٔ انتقال قدرت باهم در تولید توان مورد نیاز خودرو نقش دارند. توان تولیدی از هر یک از این دو سامانه در بخشی به نام جمع کننده، با هم جمع شده و به چرخها می‌رود.

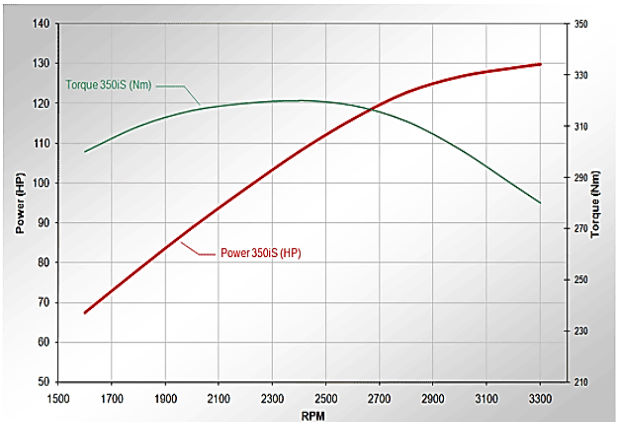
به علاوه، یکی یا هردوی این سامانه‌ها می‌توانند یک طرفه یا دو طرفه باشند، به این معنا که تنها قادر به عرضهٔ انرژی باشند یا اینکه بتوانند هم انرژی بدهند هم انرژی بگیرند. به عنوان مثال، در ساختار نشان داده شده در شکل ۱، مجموعه منبع و مبدل انرژی ۱، یک سامانهٔ انتقال قدرت یک طرفه و مجموع منبع و مبدل انرژی ۲، یک سامانهٔ انتقال قدرت دو طرفه را تشکیل می‌دهند. به این ترتیب می‌توان انرژی از منبع ۱ دریافت کرد. ولی نمی توان به آن انرژی داد و در سمت دیگر، منبع ۲ این قابلیت را دارد که هم انرژی بدهد و هم انرژی در یافت کند. حال اگر در ساختار فوق، از سوخت سنگواره‌ای و موتور احتراق داخلی به عنوان منبع و مبدل انرژی ۱ و از قوه و موتور برقی به عنوان منبع و مبدل انرژی ۲ استفاده شود، یک خودروی دورگهٔ برقی حاصل می‌شود که قابلیت جذب انرژی در بخش برقی را دارد و لذا می‌توان قوه‌های سامانه برقی را از طریق موتور احتراقی یا ازطریق چرخها (بازیافت انرژی جنبشی اتومبیل در هنگام ترمزگیری) تقویت کرد. ساختاری که در شکل ۱ معرفی شد، کلی‌ترین ساختاری است که می‌توان برای خودروهای دورگه ارائه کرد.

۳- معادلات حاکم خودروی دورگه

در این قسمت به شبیه‌سازی معادلات گشتاور و توان موتور احتراقی و برقی و سپس نیروهای مقاوم وارد بر خودرو پرداخته می‌شود.

۳-۱- معادلات گشتاور و توان موتور احتراقی

در موتورهای احتراق داخلی گشتاور و توان به‌صورت منحنی درجه دوم اند، بدین صورت که در محدوده کاری موتور و حالت تمام بار، در ابتدا با افزایش دور موتور افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر کاهش می‌یابند، شکل زیر گواه این امر است.



شکل ۲: نمودار توان و گشتاور موتور احتراقی در دورهای مختلف [۷]

بین توان و گشتاور تولیدی موتور همواره معادلهٔ زیر برقرار است:

$$P_e = T_e \times \omega_e \qquad (۱)$$

P توان، T گشتاور و ω سرعت دورانی است.

معادلهٔ درجه دوم برای گشتاور و توان به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

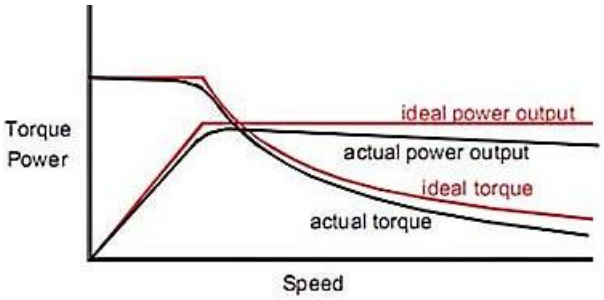
$$T_e = a\omega^2 + b\omega + c \quad (۲)$$

$$P_e = \omega \times (a\omega^2 + b\omega + c) \quad (۳)$$

که در این معادلات ضرایب a، b و c مقادیری ثابت اند که با توجه به سرعت‌هایی که به ازای آنها توان و گشتاور بیشینه به‌دست می‌آیند، قابل محاسبه اند.

۳-۲- معادلات موتور برقی

موتورهای برقی در یک بخش (دورهای پایین) دارای گشتاور ثابت و در دورهای بالاتر دارای توان ثابت اند. نمودار آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار توان و گشتاور موتور احتراقی در دورهای مختلف [۷]

برای بخش گشتاور ثابت معادلهٔ زیر بر قرار است.

$$T_m = cte \quad \& \quad P_m = T_m \times W_m \quad (۴)$$

برای بخش توان ثابت نیز معادلهٔ زیر برقرار است.

$$P_m = cte \quad \& \quad T_m = \frac{P_m}{W_m} \quad (۵)$$

۳-۳- نیروی پیش‌ران

نیروی پیش‌ران برای خودرو توسط چرخها در محور محرک خودرو اعمال می‌شوند، که با در نظر گرفتن نسبت تبدیل‌های مسیر از معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$F_{tractive} = \frac{T_e\, R_d\, R_t\, \eta_t}{R_{wheel}} \quad (۶)$$

R_d : نسبت کاهش جعبه دنده

R_t : نسبت کاهشی مقابله کننده

R_{wheel}: شعاع گردش چرخ

η_t: بازده موتور

معادلهٔ میان سرعت خودرو و سرعت دورانی موتور بدین شکل است:

$$V_{vehicle} = \frac{2\pi}{60} \times \left(\frac{R_{wheel}}{R_d R_t}\right) \times \omega_e \quad (۷)$$

با معادلهٔ گشتاور تولیدی موتور برحسب دور موتور (معادلهٔ (۲)) و با استفاده از معادلهٔ (۵) می‌توان گشتاور خروجی موتور را در یک نسبت تبدیل معین جعبه‌دنده به‌صورت تابعی از سرعت خودرو به‌دست آورد.

سپس با جایگذاری در معادلهٔ (۴) می‌توان نیروی پیش‌ران را به‌صورت تابعی از سرعت خودرو به‌دست آورد. لازم به ذکر است که در معادلات بیان شده گشتاور و توان مربوط به موتور برقی و احتراقی به صورت مجزا در نسبت دنده‌های مسیر خود تا رسیدن به محور محرک تأثیر می‌پذیرند.

۳-۴- نیروهای مقاوم وارد بر خودرو

پس از محاسبهٔ منحنی‌های نیروی پیش‌ران، برای محاسبهٔ مشخصه‌های عملکردی خودرو، باید نیروهای مقاوم وارد بر خودرو را نیز شبیه سازی نمود. نیروهای مقاوم وارد بر خودرو را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد.

۳-۵- مقاومت هوا (R_A)

نیروی مقاومت هوا که همان نیروی پسا[1] است، درواقع عکس‌العمل مولکول‌های هوا در برابر عبور خودرو از میان آنها است.

$$R_A = \frac{1}{2}\rho_{air}\, C_d\, {V_{vehicle}}^2 A_f \quad (۸)$$

که ρ چگالی، C ضریب درگ، V سرعت و A سطح مقطع است.

۳-۶- مقاومت شیب

مؤلفه‌ای از نیروی وزن خودرو است که در راستای سطح شیب‌دار است، بدیهی است که در مسیرهای تخت و افقی مقدار این نیرو برابر صفر خواهد بود.

$$W_G = W\, sin\alpha \quad (۹)$$

۳-۷- مقاومت غلتشی چرخ‌ها (R_r)

این نیرو شامل نیروی تغییر شکل چرخ در نقطه تماس با سطح جاده، لغزش چرخ و گردش هوا در اطراف چرخ است. این نیرو در سرعت‌های کمتر از ۳۰ الی ۴۰ مایل بر ساعت اصلی ترین نیروی مقاوم وارد بر خودرو است.

چندین معادلهٔ مختلف برای محاسبهٔ مقاومت غلتشی چرخ‌ها وجود دارد که در این تحقیق از معادلهٔ ۱۰ برای محاسبهٔ مقاومت غلتشی استفاده شده است.

$$R_r = Fr \times W \quad (۱۰)$$

[1] Drag force **یقشل**

که Fr ضریب مقاومت غلتشی است و با توجه به نوع چرخ و جاده متفاوت است.

نیروی مقاوم کلی، جمع نیروهای فوق خواهد بود:

$$R_{total} = R_G + R_A + R_r \quad (۱۱)$$

۳-۸- مصرف سوخت در موتور احتراقی

به‌طورکلی برای هر سامانهٔ انتقال قدرتی با داشتن منحنی مصرف سوخت ویژه (bsfc) به‌صورت تابعی از دور و توان تولیدی موتور، می‌توان مصرف سوخت را در مدت زمان t از معادلهٔ ۱۲ محاسبه نمود:

$$FC = \int_0^t bsfc \times P_e \times dt \quad (۱۲)$$

که P_e توان خروجی موتور است.

باید توجه داشت که در معادلهٔ ۱۲، bsfc با توجه به دور و گشتاور موتور از جدول مصرف سوخت قابل تعیین است.

۴- شبیه‌سازی خودروی دورگه در نرم‌افزار و مقایسه با نتایج تجربی

در این پژوهش ابتدا طرح خودروی احتراقی شبیه‌سازی می‌شود و با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی ارائه شده توسط سازنده ارزیابی طرح انجام می‌شود.

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی خودروی احتراقی، شبیه‌سازی خودروی دورگه ارائه می‌شود و متغیرهای اساسی مؤثر بر عملکرد خودروی دورگه بررسی می‌گردد.

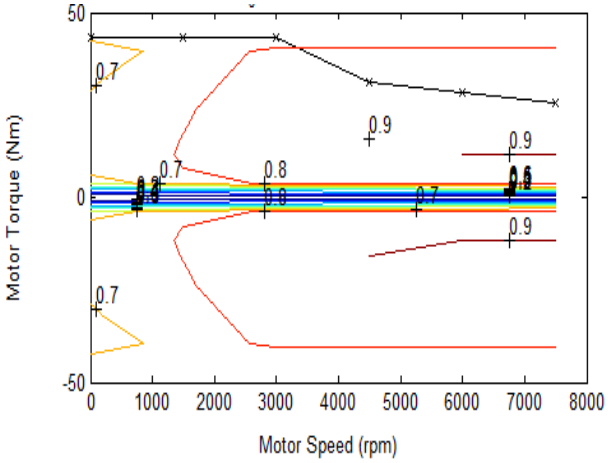
۴-۱- متغیرها و شرایط شبیه‌سازی

از آنجایی که در این پژوهش هدف بررسی استفاده از سامانهٔ دورگه در خودرو پژو ۲۰۶ است، از اطلاعات خودرویی پژو ۲۰۶ استفاده خواهد شد.

جدول ۱: اطلاعات مورد نیاز خودروی پژو ۲۰۶ [۴]

مشخصات موتور احتراقی	حجم موتور	۱۳۶۰
	تعداد استوانه‌ها	۴
	قرار گیری استوانه‌ها	خطی مستقیم
	توان (د.د.د. / اسب بخار)	۷۵ / ۵۵۰۰
	گشتاور (د.د.د. / نیوتن متر)	۱۱۸ / ۳۴۰۰
مشخصات عملکردی	سرعت بیشینه (km/h)	۱۷۰
	شتاب ۰ الی ۱۰۰ (برحسب ثانیه)	۱۴,۱
	مصرف سوخت (ترکیبی)	۶,۴ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر
	استاندارد آلایندگی	یورو ۳
مشخصات خودرویی	طول (mm)	۳۸۲۲
	عرض (mm)	۱۶۵۲
	ارتفاع (mm)	۱۴۳۲
	فاصله بین دو محور عقب و جلو(mm)	۲۴۴۵
	وزن خالص خودرو بدون سرنشین با مخزن پر و بدون تجهیزات اضافی(kg)	۱۰۲۵
	گنجایش مخزن سوخت (لیتر)	۵۰

موتورهای برقی که در خودروهای دورگه استفاده می‌شود، می‌تواند در هر دو حالت مولد و تولیدکنندهٔ برق[1] کارکند، بدین صورت تولیدکنندهٔ برق و موتور برقی نشان داده شده در شکل ۴ با یک موتور برقی دو منظوره جایگزین می‌شود، بدین صورت وزن سامانه برقی تا حد قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. مشخصات نمونه‌ای از این موتور برقی با توان ۲۰kw در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴: مشخصه‌های عملکردی موتور برقی – تولیدکنندهٔ برق با توان ۲۰kw [۷]

موتور برقی انتخاب شده قابلیت عملکرد به صورت تولیدکنندهٔ برق را دارا است، نقاط کاری با گشتاور منفی در شکل بالا نشان دهنده حالت تولیدکنندهٔ برقی است.

۴-۱-۱- مشخصات سامانهٔ دورگه انتخاب شده

در این تحقیق سامانهٔ دورگهٔ موازی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.

سامانهٔ دورگهٔ موازی در حال حاضر در خودروهای دورگه بسیاری از قبیل: هندا اینسایت، Civic و Accord، تویوتا پریوس استفاده می‌گردد [۸ و ۹]. شرکت هیوندای نیز قصد دارد در سال ۲۰۱۵ خودرو سوناتا مجهز به سامانهٔ دورگهٔ موازی را روانه بازار کند [۱۰].

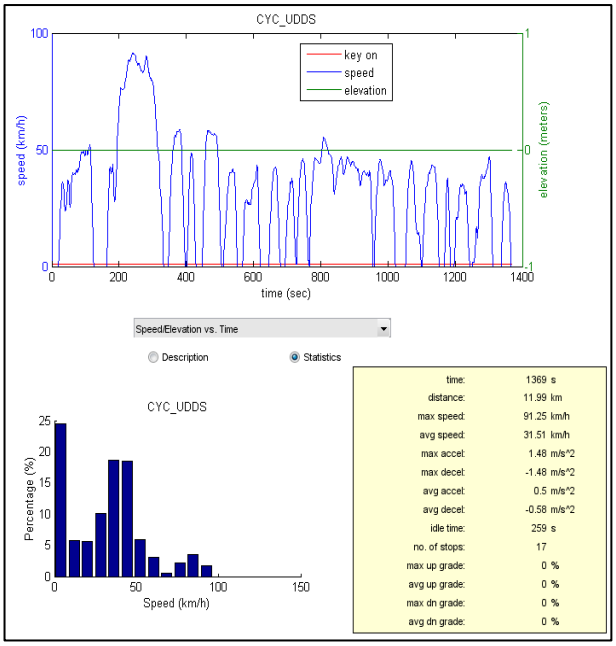
از آنجایی که در این پژوهش هدف بررسی استفاده از سامانهٔ دورگه در خودرو پژو ۲۰۶ است، از اطلاعات خودرویی پژو ۲۰۶ استفاده خواهد شد. برای بخش موتور احتراقی نیز از موتور احتراقی خودروی پژو ۲۰۶ استفاده می‌گردد (شامل: توان و گشتاور بیشینه، مشخصه‌های مصرف سوخت). بخش برقی (موتور برقی، تولیدکنندهٔ برق، قوه و سایر اجزا)؛

[1] Generator

با توجه به این که اطلاعات دقیقی در شرکت‌های خودرو ساز داخلی وجود ندارد از نمونه‌های موجود در نرم‌افزار که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی اند، استفاده می‌گردد.

۴-۲- شرایط شبیه‌سازی

برای محاسبهٔ مصرف سوخت از چرخهٔ رانندگی اروپا[1] استفاده می‌شود. چرخهٔ رانندگی اروپا یکی از چرخه‌های رایج برای بررسی عملکرد خودرو در خصوص مصرف سوخت است ولی این چرخه همانطور که در شکل مشاهده می‌شود کاملاً تصفیه شده است و از شرایط واقعی رانندگی به دور است، از دیگر چرخه‌های رایج برای بررسی عملکرد خودرو می‌توان به چرخه‌های UDDS، SC03 و چرخهٔ رانندگی تهران اشاره نمود.

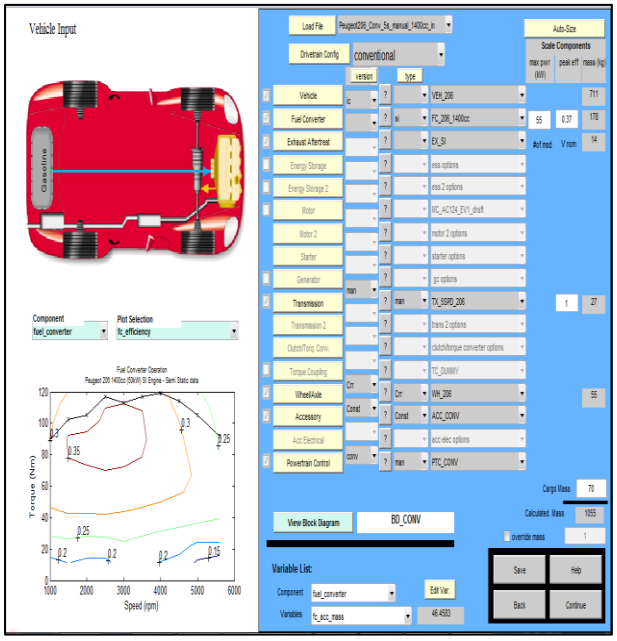


شکل ۵: مشخصات چرخهٔ UDDS

همانطور که مشاهده می‌شود چرخه‌های ذکر شده دارای شتابگیری و ترمزگیری‌های شدیدتری نسبت به چرخهٔ NEDC اند و به شرایط واقعی نزدیکتر اند، بنابراین از این چرخه‌ها برای بررسی عملکرد خودروی دورگه استفاده خواهد شد.

۴-۳- خودروی احتراقی ۲۰۶

در شکل ۶ اجزای تعریف شده برای خودروی ۲۰۶ در نرم‌افزار ADVISOR مشخص است.



شکل ۶: اجزای خودروی ۲۰۶ تعریف شده در ADVISOR.

نرم‌افزار در مواردی که با شبیه‌سازی‌های بسیار پیچیده نیروی محرکه خودرو نظیر موتورهای احتراقی و برقی یا قوه‌ها روبرو می‌شود خود را درگیر با معادلات و معادلات بسیار پیچیده نمی‌کند و در اغلب این موارد،از نتایج واقعی آزمایشگاهی بهره می‌برد. به عنوان مثال برای تعیین مقدار آلایندگی (یا مصرف سوخت)، مشخصه‌های آلایندگی خروجی از موتور در شرایط کاری گوناگون که به‌صورت آزمایشگاهی تست شده جمع آوری می‌شود و به عنوان الگوی آلایندگی وارد نرم‌افزار می‌گردد. متکی بودن به نتایج آزمون واقعی دقت شبیه سازی را تضمین می‌کند.

معمولاً تجربی:

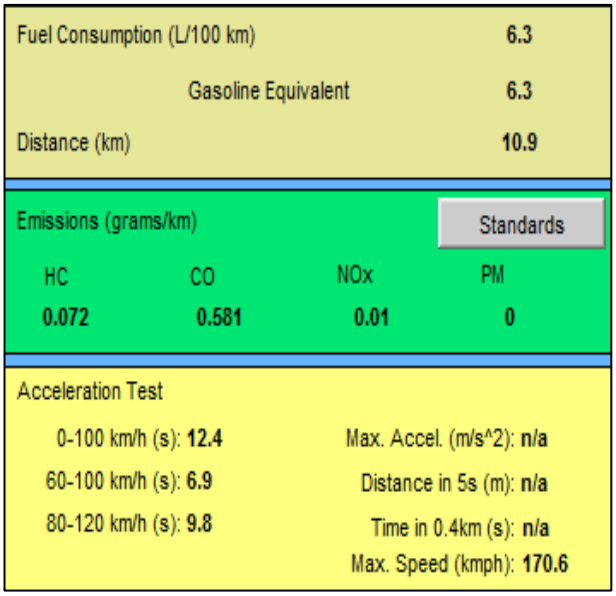
- تکیه بر بر معادلات اندازه‌گیری شده (ورودی/ خروجی) یک عنصر سامانهٔ محرکه

شبه استاتیک:

- به‌دست آمده از اطلاعات جمع آوری شده در حالت ماندگار
- بررسی اثرات گذرا: تصحیح خروجی برای اعمال اثرات گذرایی مانند اینرسی چرخشی اجزای سامانهٔ محرکه

علاوه بر محاسبهٔ مصرف سوخت، متغیرهای عملکردی نظیر شتابگیری و سرعت بیشینه نیز بررسی و مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

[1] NEDC: New European Driving Cycle



شکل ۷: مصرف سوخت و عملکرد خودروی ۲۰۶ در ADVISOR.

برای مشخص شدن صحت شبیه‌سازی نتایج حاصل از آن با نتایج واقعی مقایسه می‌گردد، که این مقایسه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج واقعی

متغیر	مقدار شبیه‌سازی شده	مقدار واقعی	خطا (٪)
مقدار مصرف سوخت در چرخهٔ NEDC (L/100km)	۶,۳۱	۶,۴	۱,۴۱
زمان رسیدن به سرعت ۱۰۰km (Sec)	۱۲,۴	۱۲,۲	۱,۶۴
سرعت بیشینه (km)	۱۷۰,۶	۱۷۰	۰,۳۵

همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار خطا کمتر از ۲٪ است، بنابراین شبیه‌سازی انجام شده از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده و می‌توان به نتایج حاصل از آن اعتماد نمود.

حال که از صحت شبیه‌سازی ایجاد شده اطمینان حاصل شد، می‌توان عملکرد خودرو را در چرخه‌های دیگر بررسی نمود، نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مصرف سوخت خودروی شبیه‌سازی شده در چرخه‌های رانندگی

ردیف	نام چرخه	مصرف سوخت (L/100km)	طول چرخه (km)
۱	UDDS	۶,۲۵	۱۱,۹۹
۲	SC03	۶,۴۸	۵,۷۶
۳	Tehran cycle	۶,۳۳	۱۳,۴۲
۴	NEDC	۶,۳۱	۱۰,۹۳

۴-۴- شبیه‌سازی خودروی ۲۰۶ دورگه

توان موتور احتراقی پژو ۲۰۶ برابر ۵۵ kw است، بنابر نمونه‌های انجام شده و اطلاعات موجود در نرم‌افزاربرای موتور برقی توانی در حدود ۳۰٪ الی ۸۰٪ توان موتور احتراقی انتخاب می‌گردد.

جدول ۴: مصرف سوخت خودروی دورگه به ازای موتورهای برقی و ظرفیت‌های تقویت قوهٔ مختلف برای چرخهٔ UDDS

توان Engine (kw)	توان Motor (kw)	تعداد خانه‌های قوه	مقدار مصرف سوخت	کاهش مصرف سوخت (٪)
۵۵	۲۰	۲۵	۶,۵۴	-۴,۶۴
۵۵	۴۰	۲۵	۶,۳۸	-۲,۰۸

همانطور که مشاهده می‌شود، فقط استفاده از یک موتور برقی در کنار موتور احتراقی نه تنها موجب کاهش مصرف سوخت نمی‌شود، بلکه مقدار مصرف سوخت نیز به دلایل مختلف (مانند افزایش وزن و . . .) افزایش می‌یابد.

از آنجایی که یک بخش از توان توسط موتور برقی تأمین می‌شود، ضمن حفظ عملکرد ثابت می‌توان از موتور احتراقی کوچکتری استفاده نمود. در این صورت وزن قوای محرکه کاهش خواهد یافت و این کاهش وزن تأثیر بسزایی در مقدار مصرف سوخت خواهد داشت. علاوه بر این در موتورهای احتراق داخلی، کوچکتر شدن اندازهٔ موتور (کاهش حجم استوانه) باعث بهبود عملکرد موتور شده و مصرف سوخت کمتری خواهد داشت. نتایج این بررسی در جدول ۵ تحت شرایط مختلف نشان داده شده است.

جدول ۵: مصرف سوخت خودروی دورگه در چرخهٔ UDDS

توان(kw) Engine	توان(kw) Motor	تعداد سلول‌های قوه	مصرف سوخت چرخهٔ UDDS	درصدکاهش مصرف سوخت[۱]	حداکثرسرعت (km/h)	شتاب: ۰ تا ۱۰۰ (sec)
۴۵	۲۵	۲۵	۶،۰۳	۳،۵۲	۱۸۳،۹	۱۰،۵
۳۵	۲۵	۲۵	۵،۴۶	۱۲،۶۴	۱۷۴،۲	۱۱،۷
۳۰	۲۵	۲۵	۵،۲۷	۱۵،۶۸	۱۶۷،۹	۱۲،۵
۲۵	۳۰	۲۵	۵،۳۲	۱۴،۸۸	۱۶۰،۶	۱۳،۶
۳۰	۲۵	۱۵	۵،۵۴	۱۱،۳۶	۱۵۰،۲	۱۵،۵

همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، درصورتی‌که نسبت توان‌های مناسب برای موتور احتراقی و برقی انتخاب نشود مصرف سوخت بهبود چندانی نمی‌یابد (ردیف ۱)، همچنین اگر توان موتور احتراقی بیش‌ازحد کم انتخاب گردد (ردیف ۴) علاوه برافزایش مقدار مصرف سوخت (نسبت به‌ردیف ۳)، عملکرد خودرو تحت تأثیر قرارگرفته و از شرایط مورد نظر دور می‌گردد (کاهش شتاب و سرعت بیشینه). همچنین اگر ظرفیت قوه نسبت به توان موتور برقی کوچک باشد، از عملکرد موتور برقی کاسته شده و شرایط عملکردی خودرو از حالت مورد نظر دور می‌شود (ردیف ۵).

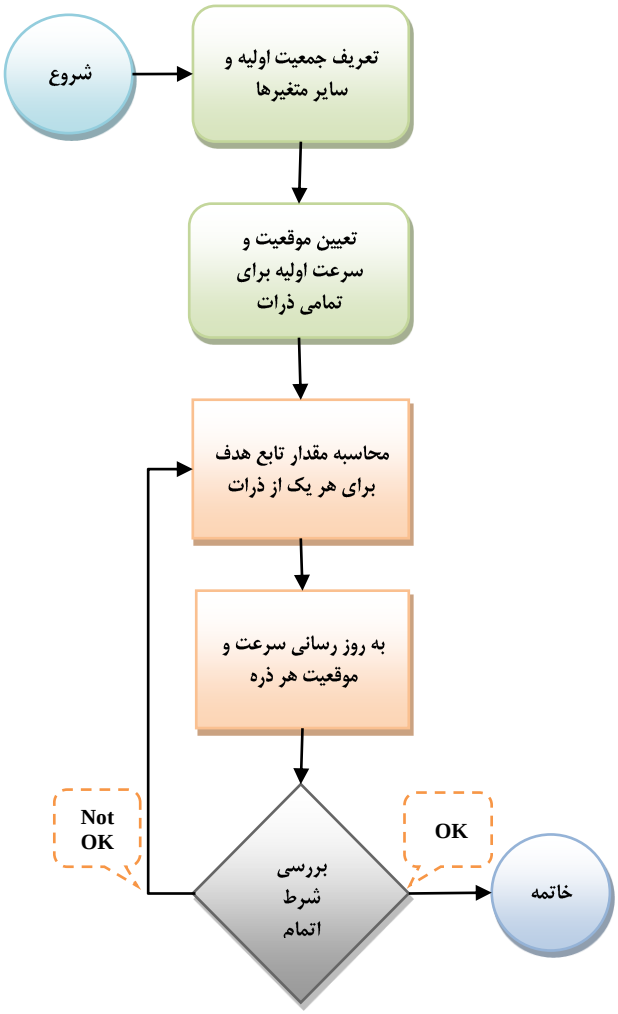
با توجه به نتایج مشاهده شده و توضیحات آنها، مشخص است که یک حالت مناسب برای نسبت توان موتور احتراقی و برقی و ظرفیت قوه وجود دارد که تحت آن شرایط ضمن عملکرد یکسان بهینه‌ترین مقدار مصرف سوخت حاصل می‌گردد. بنابراین برای به‌دست آوردن توان مناسب برای موتور برقی و احتراقی و ظرفیت مناسب قوه، نیاز به یک بهینه‌سازی است. در ادامه به بهینه‌سازی در نرم‌افزار ADVISOR پرداخته می‌شود.

۵- بهنیه سازی

برای بهینه‌سازی از روش گروهی ذرات (PSO[۲]) استفاده شده است. یکی از روش‌های پرکاربرد و نسبتاً قوی در بهینه‌سازی مسائل، روش گروهی ذرات است، که بر اساس رفتارهای گروهی مشاهده شده در طبیعت نظیر رفتار گروهی پرندگان، دسته‌ای از ماهی‌ها، گروهی از زنبورهای عسل و حتی رفتارهای اجتماعی انسان‌ها برگرفته شده است [۵]. روش بهینه‌سازی گروهی ذرات ابتدا در سال ۱۹۹۵ توسط کندی[۳] و ابرهارت[۴] توصیف شد.

اندازه و ابعاد هر ذره در مجموعه PSO، بر اساس متغیرهای بهینه‌سازی تعریف می‌شوند، که قادرند به راحتی برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی استفاده گردند. مهمترین خصوصیت روش PSO، همگرایی سریع‌تر[۵] نسبت به بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی، نظیر روش وراثت (GA[۶])، سرد شدن تدریجی فلزات (SA[۷]) و سایر روش‌های بهینه‌سازی است. در این پژوهش نیز برای به‌دست آوردن بهترین حالت خودروی دورگه (کمترین مقدار مصرف سوخت ضمن حفظ عملکرد خودرو) از روش گروهی ذرات استفاده می‌شود.

۵-۱- روش حل مسئله



شکل ۸: روش‌نمای بهینه‌سازی

[۱] مقدار مصرف سوخت در چرخهٔ UDDS، ۶،۲۵ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلومتر

[۲] Particle Swarm Optimization

[۳] James Kennedy
[۴] Russell C. Eberhart
[۵] Fast convergence
[۶] Genetic Algorithm
[۷] Simulated Annealing

معادلات به روز رسانی سرعت و موقعیت هر ذره در PSO عبارتند از:

$$V_{i,t+1} = k\left[\omega V_{i,t} + C_1 r_{1,t}\left(P_{i,t} - X_{i,t}\right) + C_2 r_{2,t}\left(P_{g,t} - X_{i,t}\right)\right] \quad (۱۳)$$

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t+1} \quad (۱۴)$$

که $V_{i,t}$ سرعت فعلی ذره، $P_{i,t}$ بهترین موقعیت ذره، $P_{g,t}$ بهترین موقعیت دیگر اعضای گروه، $X_{i,t}$ موقعیت فعلی ذره و $X_{i,t+1}$ مکان بعدی ذره است.

همچنین ω ضریب اینرسی[1]، $r_{1,t}$ و $r_{2,t}$ اعداد تصادفی در بازه و C_1 و C_2 اعداد ثابت هستند. k نیز ضریب انقباض سرعت ذرات است که بهتر است در طول تکرارها به‌صورت لگاریتمی کاهش یابد [۶].

در این روش مکان ذرات (X ها) به‌صورت برداری متشکل از تعداد متغیرهای بهینه‌سازی (ابعاد فضای جستجو) است، و همچنین سرعت ذرات (V) به‌صورت برداری متشکل از سرعت هر متغیر بهینه‌سازی برای هر ذره است. درواقع بردار سرعت به ذرات این امکان را می‌دهد که بتوانند در فضای جست‌وجو به‌صورت کارآمد حرکت کنند، برای این‌که ذرات در طی تکرارها بتوانند به‌صورت جامع تمامی فضای جست و جو را پوشش دهند مقادیر سرعت در بازه‌ای خاص $[-V_{max}, V_{max}]$ محدود می‌شوند [۵]. توصیه شده است که سرعت بیشینه هر یک از متغیرهای ذرات در PSO متناسب با ابعاد فضای آن متغیر باشد، که معادلهٔ آن به‌صورت زیر خواهد بود.

$$V_{max} = \frac{X_{max} - X_{min}}{20} \quad (۱۵)$$

۵-۲- شرایط و فرضیات حل مسئله

قبل از پرداختن به بهینه‌سازی باید تمامی شرایط و فرضیات حل مسئله مشخص گردد. در ابتدا می‌بایست متغیرهای خودرویی را با متغیرهای بهینه‌سازی مرتبط نمود، که این ارتباط به شکل زیر است:

الف) تابع هدف: مقدار مصرف سوخت خودرو – کمترین مقدار بهینه‌ترین حالت است.

ب) قیدهای مسئله: عملکرد خودرو (سرعت بیشینه و شتاب) – نباید از حالت خودروی ۲۰۶ غیر دورگه کمتر شوند.

ج) متغیرهای بهینه‌سازی: توان موتور احتراقی، توان موتور برقی و ظرفیت قوه

سایر شرایط و فرضیات حل مسئله به شرح ذیل است:

د) سطح تقویت قوه در شروع چرخه و انتهای چرخه برابر باشد.

ه) خودرو در چرخهٔ رانندگی UDDS حرکت می‌کند.

ز) منحنی مصرف سوخت موتور احتراقی بر حسب توان آن به صورت خطی تغییر می‌کند.

ی) اثرات ناشی از وزن قوه و موتور احتراقی و برقی در نظر گرفته شده است.

و) هرگاه به ازای ۲۰ تکرار پی درپی بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود، فرآیند بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

۵-۳- روند بهینه‌سازی تابع هدف

در ابتدا می‌بایست متغیرهای خودرویی را با متغیرهای بهینه‌سازی مرتبط نمود، که این ارتباط به شکل زیر است. برای نوشتن مسئله بهینه‌سازی بالا به فرم ریاضی در ابتدا متغیرهای لازم را به صورت جدول زیر تعریف می‌کنیم:

جدول ۶: متغیرهای بهینه‌سازی

متغیر	معادل انگلیسی	توصیف
FC	Fuel Consumption	مقدار مصرف سوخت
P_C	Power of Combustion Engine	توان موتور احتراقی
P_E	Power of Electrical Motor	توان موتور برقی
SOC	State of Charge	ظرفیت قوه
V_max	Maximum Velocity	سرعت بیشینه
A_max	Maximum Acceleration	شتاب بیشینه
V_max۲۰۶	Maximum Velocity of 206	سرعت بیشینهٔ خودرو ۲۰۶
A_max۲۰۶	Maximum Acceleration of 206	شتاب بیشینهٔ خودرو ۲۰۶

شکل ریاضی مسئله بهینه‌سازی بالا را می‌توان بدین صورت بیان کرد، که در آن تابع هزینه با J نمایش داده شده است:

$$J = Min\ FC(P_C, P_E, SOC)$$

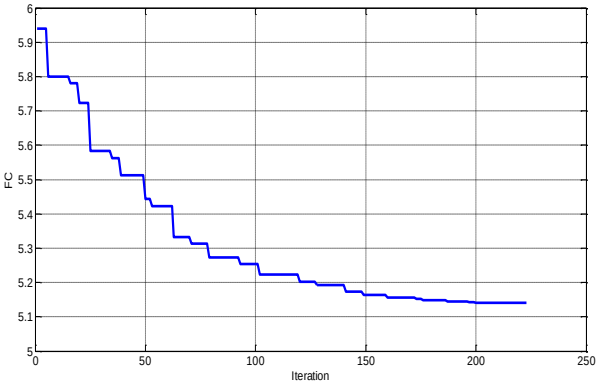
$$Subject\ to:$$

$$V_{max} > V_{max206} \quad (۱۶)$$

$$A_{max} > A_{max206}$$

با فرضیات و تعریفات انجام شده، بهینه‌سازی انجام می‌شود، روند بهینه‌سازی در مقدار تابع هدف در شکل ۹ نشان داده شده است.

[1] Inertia Factor



شکل ۹: روند بهینه شدن تابع هدف (مصرف سوخت)

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، رفته رفته مقدار تابع هدف (مقدار مصرف سوخت) کاهش می‌یابد، تا جایی که دیگر به ازای تکرارهای بیشتر بهبود چندانی حاصل نمی شود.

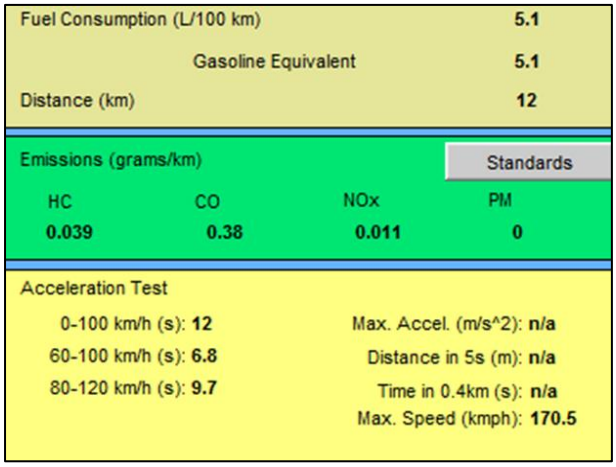
۵-۴- نتایج در شرایط بهینه‌سازی متغیرهای سامانهٔ محرکه

در جداول زیر نتایج حاصل از بهینه‌سازی متغیرهای سامانهٔ محرکه (توان موتور احتراقی، توان موتور برقی و ظرفیت قوه) نشان داده شده است.

جدول ۷: متغیرهای بهینه شده برای کاهش مصرف سوخت در چرخهٔ رانندگی UDDS

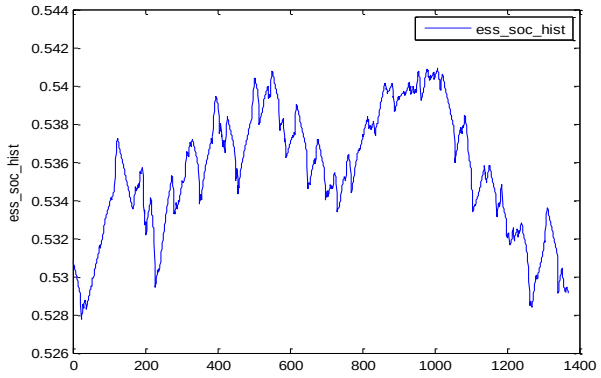
ویژگی	مقدار
توان Engine (kw)	۳۲
توان Motor (kw)	۲۲
تعداد سلول‌های قوه لیتیومی	۳۰
مقدار مصرف سوخت (L/100km)	۵,۱۴
سرعت حداکثر (km/h)	۱۷۰,۵
زمان ۰-۱۰۰ (Sec)	۱۲

همانطور که مشاهده می‌شود در حالت بهینه مقدار مصرف سوخت به مقدار ۱۷,۷۶٪ نسبت به خودروی غیر دورگه ضمن حفظ عملکرد یکسان، کاهش داشته است.



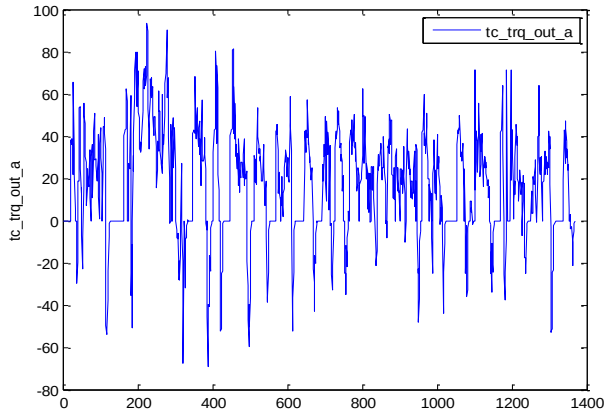
شکل ۱۰: متغیرهای عملکردی در خودروی دورگه بهینه شده در چرخهٔ رانندگی UDDS

همانطور که مشاهده می‌شود در مقادیر زمان شتاب گیری‌ها نسبت به خودروی غیر دورگه بهبود اندکی ایجاد شده است.
سطح تقویت قوه در طی چرخهٔ UDDS به شکل زیر است.



شکل ۱۱: سطح تقویت قوه در طی چرخهٔ UDDS

مقدار گشتاور موتور برقی در طی چرخه به شکل زیر است.



شکل ۱۲: گشتاور موتور برقی در طی چرخهٔ UDDS

همانطور که مشاهده می‌شود، موتور برقی در طی چرخه دارای گشتاورهای منفی است، که این گشتاورهای منفی حالت بازیابی انرژی حاصل از ترمز گیری را نشان می‌دهد که صرف تقویت قوه می‌گردد.

۵-۵- عملکرد خودروی بهینه شده در سایر چرخه‌ها

حال می‌بایست بررسی نمود که آیا این حالت بهینه برای سایر چرخه‌ها نیز مناسب است یا خیر. زیرا که در حالت واقعی رفتار خودرو مشخص نبوده و طراحی می‌بایست در تمامی شرایط وضعیت مطلوبی ایجاد نماید، به همین علت با مقادیر توان‌های موتور احتراقی و برقی و ظرفیت قوه بهینه شده برای چرخهٔ UDDS، به محاسبهٔ مصرف سوخت خودرو در چرخه‌های دیگر پرداخته می‌شود، نتایج حاصل از آن در جدول ۷ آورده شده است.

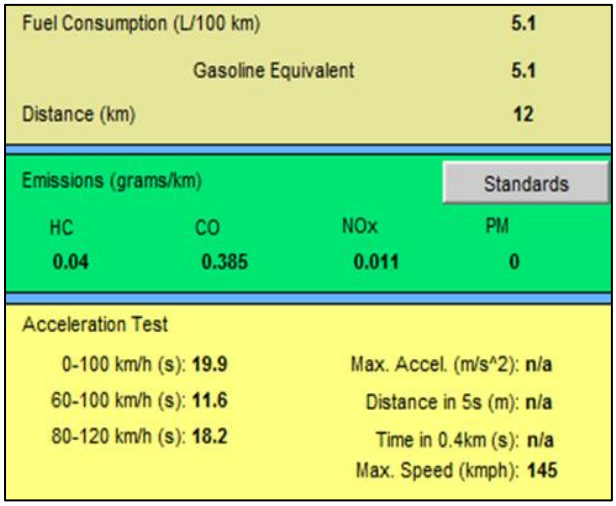
جدول ۸: مقدار مصرف سوخت خودرو دورگه بهینه شده (سامانهٔ محرکه) در چرخه‌های مختلف رانندگی

نام چرخه	مصرف سوخت حالت عادی (L/100km)	مصرف سوخت حالت هیبردی بهینه شده (L/100km)	مقدار بهبود (٪)
UDDS	۶,۲۵	۵,۱۴	۱۷,۷۶
SC03	۶,۴۸	۵,۵۱	۱۴,۹۷
Tehran cycle	۶,۳۳	۵,۳۱	۱۶,۱۱
NEDC	۶,۳۱	۵,۹۸	۵,۲۳

همانطور که مشاهده می‌شود، سامانهٔ دورگه بهینه شده در تمامی چرخه‌های رانندگی عملکرد بهتری از نظر مقدار مصرف سوخت دارد، چرخهٔ NEDC به علت آنکه دارای ترمز گیری‌های شدید نیست، مقدار بازیابی انرژی برقی حاصل از ترمزگیری بسیار ناچیز است، به همین علت مقدار بهبود در مصرف سوخت تحت این چرخه در مقایسه با سایر چرخه‌ها کمتر است.

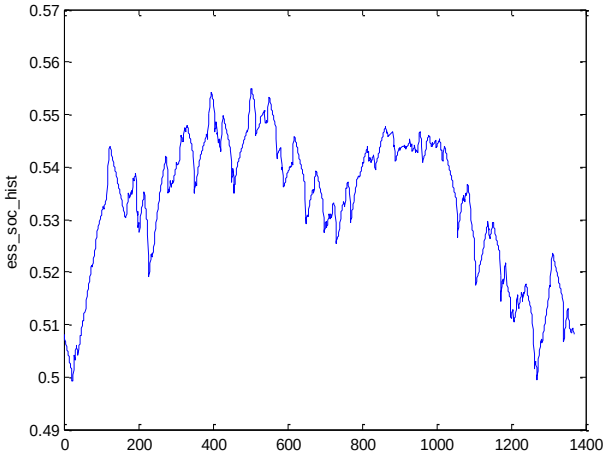
۵-۶- بررسی عملکرد خودرو با استفاده از قوه کوچکتر

در شکل ۱۶ که سطح تقویت قوه را در طی چرخهٔ UDDS نشان می‌دهد، مشاهده شد که سطح تقویت تغییرات چندانی ندارد. شاید این‌طور برداشت شود که می‌توان از قوه کوچکتری استفاده نمود، جدول زیر نتایج حاصل از عملکرد خودرو با ظرفیت قوه ۴۰٪ است.



شکل ۱۳: متغیرهای عملکردی خودرو در صورت استفاده از قوهٔ کوچکتر

همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد خودرو از نظر سرعت بیشینه و شتاب گیری تحت تأثیر قرار گرفته و از شرایط مناسب دور شده است، بنابراین نمی‌توان ظرفیت قوه را از مقدار بهینهٔ محاسبه شده کمتر در نظر گرفت. سطح تقویت قوه در این شرایط نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: سطح تقویت قوه با ظرفیت پایین، در طی چرخهٔ UDDS

۵-۷- بهینه‌سازی سایر متغیرهای مؤثر در عملکرد خودرو

از جمله متغیرهای دیگری که می‌تواند در عملکرد خودروی دورگه مؤثر باشد، می‌توان به نسبت دنده در جعبه دنده خودرو و نسبت دنده در بخش اتصال موتور برقی به سامانهٔ انتقال قدرت اشاره نمود. جعبه دنده خودروی مدل شده ۵ سرعته (۵ دنده رو به جلو) است، با در نظر گرفتن آنها و نسبت دنده دیفرانسیل و نسبت تبدیل اتصال موتور برقی، ۷ متغیر تأثیر گذار جدید بر عملکرد خودرو ایجاد خواهد شد.

منظور از بهینه‌سازی نسبت دنده‌های جعبه دنده، استفاده از نسبت دندهٔ جعبه دندهٔ پیوسته (CVT) در چرخه‌های رانندگی استاندارد در محیط نرم افزار ADVISOR است. برخلاف سامانهٔ انتقال قدرت دستی که تعویض دنده بین چند حالت صورت می‌گیرد،در سامانهٔ

انتقال قدرت با قابلیت تغییر پیوسته، جعبه دنده‌ای دارای تعداد مشخص نسبت دنده نیست و نسبت مناسب بایستی از بین طیف پیوسته ای از نسبت‌ها انتخاب این شرایط کار ویژگی‌های مثبت و منفی را در پی دارد. امکان انتخاب هر نسبت دنده دلخواه موجب می‌شود که موتور احتراق داخلی از نظر نقطه کارکرد کاملاً تحت پایش قرار گیرد.

حال می‌توان متغیرهای مذکور را نیز بررسی و بهینه‌سازی کرد. مشابه حالت قبل بهینه‌سازی برای چرخهٔ UDDS انجام خواهد شد و بر اساس مقادیر بهینه به‌دست آمده مصرف سوخت در سایر چرخه‌های رانندگی نیز محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی در جدول ۸ آورده شده است.

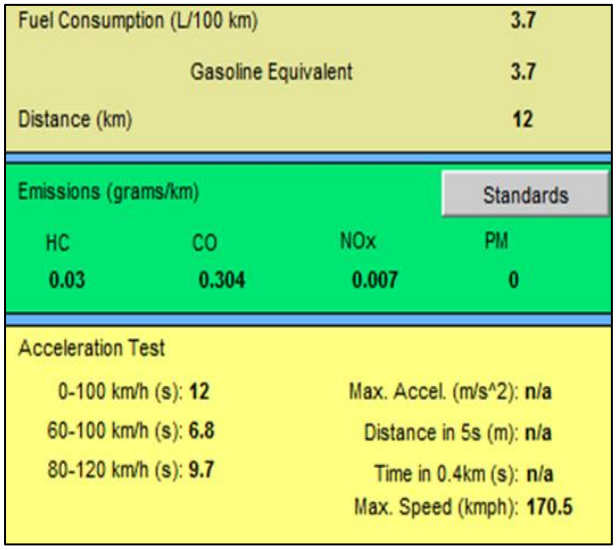
جدول ۹: مقدار مصرف سوخت خودروی دورگه بهینه شده (سامانهٔ محرکه و انتقال قدرت) در چرخه‌های مختلف رانندگی

نام چرخه	مصرف سوخت حالت عادی (L/100km)	مصرف سوخت حالت هیبردی بهینه شده (L/100km)	مقدار بهبود (٪)
UDDS	۶,۲۵	۴,۹۲	۲۱,۲۸
SC03	۶,۴۸	۵,۳۹	۱۶,۸۲
Tehran cycle	۶,۳۳	۵,۱۷	۱۸,۳۲
NEDC	۶,۳۱	۵,۸۰	۸,۰۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بهینه‌سازی نسبت دنده‌های جعبه دنده، دیفرانسیل و اتصال موتور برقی، می‌توان به شرایط مناسب‌تری دست یافت، هرچه تعداد متغیرهای مورد بررسی که بر عملکرد خودرو تأثیر دارند، بیشتر باشد، حالت بهینه مناسب‌تری ایجاد می‌گردد.

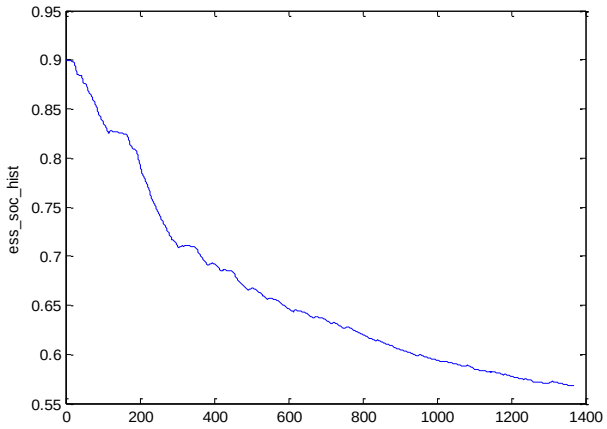
۵-۸- خودروی تقویت شونده با برق شهر

اگر فرض شود که خودرو توانایی تقویت با برق شهر را دارا باشد، آنگاه می‌توان قید برابری سطح تقویت در شروع چرخه و انتهای آن را حذف نمود. با فرض آنکه در چنین شرایطی قوه همان خودور بهینه شده، ۹۰٪ تقویت داشته باشد، آنگاه نتایج زیر برای آن حاصل می‌گردد.



شکل ۱۵: متغیرهای عملکردی خودرو در صورت تقویت با برق شهر

همانطور که مشاهده می‌شود، در این حالت مقدار مصرف سوخت به ۳,۷۴ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلومتر است، به عبارت دیگر به مقدار ۴۰,۱۶٪ کاهش خواهد یافت. البته باید توجه داشت که طی مسافت با این شرایط محدود است. سطح تقویت قوه در این شرایط در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: سطح تقویت قوه با ظرفیت پایین، در طی چرخهٔ UDDS

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، سطح تقویت قوه ۳۵٪ کاهش داشته است و به سطح تقویت ۵۵٪ رسیده است. در شکل ۵ نیز مشاهده شد که برای آنکه در ابتدا و انتهای چرخهٔ UDDS سطح تقویت ثابت بماند، سطح تقویت در حدود ۵۱٪ باید باشد، بنابراین می‌توان با استفاده از برق شهر در ۱۲ کیلومتر اولیه مصرف سوختی در حدود ۳,۷ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلومتر داشت و سپس مسیر را با مصرف سوخت حدود ۵ الی ۵,۳ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلومتر ادامه داد، که این کار می‌تواند سهم آلودگی صبح گاهی را در شهرها به مقدار قابل توجهی کاهش دهد.

در واقع با این کار در کیلومترهای ابتدایی، عملکرد خودرو از حالت دورگه به سمت خودروی برقی نزدیک می‌شود، که کاهش بسزایی در مقدار مصرف سوخت به همراه خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خودرو پژو ۲۰۶ مجهز به سامانهٔ دورگهٔ موازی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت و طبق آن نتایج زیر حاصل گردید:

۱) صرفاً ایجاد خودروی دورگه باعث کاهش مصرف سوخت نمی‌گردد، بلکه ممکن است تحت تأثیر عواملی همانند افزایش وزن خودرو، مصرف سوخت افزایش یابد.

۲) در شرایطی که یکی از متغیرهای عملکردی خودرو (مقدار مصرف سوخت) به حالت مناسبی برسد، ممکن است سایر متغیرهای نظیر سرعت بیشینه و زمان ۰ تا ۱۰۰، از حالت مناسب دور گردد.

۳) برای توان موتور احتراقی و برقی و ظرفیت قوه، یک حالت بهینه وجود خواهد داشت که می‌بایست با بهینه‌سازی مشخص گردند.

۴) با استفاده از روش بهینه‌سازی PSO، کد نویسی در نرم‌افزار متلب و اتصال آن به ADVISOR می‌توان به بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر بر عملکرد خودرو پرداخت.

۵) در حالت بهینه (توان موتور برقی، احتراقی و ظرفیت قوه) در چرخه‌های واقعی در حدود ۱۶٪ کاهش مصرف سوخت حاصل می‌گردد.

۶) می‌توان با استفاده از برق شهر در ۱۲ کیلومتر اولیه حرکت، مصرف سوختی در حدود ۳٫۷ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلومتر (بهبود ۴۰٪ مقدار مصرف سوخت) داشت.

۷) هرچه تعداد متغیرهای مورد بهینه‌سازی که بر عملکرد خودرو تأثیر دارند، بیشتر باشد، حالت بهینه مناسب‌تری ایجاد می‌گردد.

۸) اگر علاوه بر متغیرهای سامانهٔ محرکه (توان موتورها و ظرفیت قوه)، متغیرهای سامانهٔ انتقال قدرت (نسبت دنده‌های جعبه‌دنده و اتصال موتور برقی) نیز بهینه‌سازی شوند، می‌توان در چرخهٔ UDDS به ۲۱٪ کاهش مصرف سوخت دست یافت.

۷- مراجع

[1] N. Iwai, Analysis on fuel economy and advanced systems of hybrid vehicles, JSAE Review, Vol. 20, No. 1, pp. 3–11, 1999

[2] Salvador Aceves, J. Ray Smith, Norman L. Johnson, Computer Modeling in the Design and Evaluation of Electric and Hybrid Vehicles, 11th Annual National Educators' Workshop, Los Alamos, 1997

[3] وحید اصفهانیان، خودروهای دورگهٔ برقی، لزوم و نحوهٔ طراحی، مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست، اصفهان، ۱۳۸۴

[4] کاتالوگ و اطلاعات فنی خودروی پژو ۲۰۶، شرکت ایپکو، ۱۳۸۸

[5] H. Guo, H. L. Ajith Abraham, Swarm Intelligence: Foundations, Perspective and Applications, Springer verlag Berlin Heidelberg, pp. 3-25, 2006

[6] R.C. Eberhart, Y. Shi, Particle swarm optimization: developments, applications and resource, Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation, pp. 81–86, 2001

[7] M. Ehsani, G. Yimin, J. M. Miller, Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives, Proceedings of the IEEE, Vol.95, No.4, pp.719-728, April 2007

[8] http://www.honda.com.

[9] http://www.toyota.com.

[10] www.hyundai.com.

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Design and simulation of a hybrid electric vehicle in order to increasing efficiency and reducing pollution

F. Ommi[1], S. Souri[2*], E. Rostami[3]

[1] *Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, fommi@modares.ac.ir*
[2] *Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, saeedsouri@gmail.com*
[3] *Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, elyas.rostami@yahoo.com*
[*] *Corresponding Author, Telephone Number: +98-09127772208*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 February 2015
Accepted: 5 July 2015

Keywords:
Electrical hybrid car
Advisor software
Car 206
Increasing efficiency
Reducing pollution

ABSTRACT

Due to extreme exploitation of fossil fuels and its consequence pollution, electrical hybrid cars are the most efficient mid-term solution to reduce issues instigated by environment pollution and the increase in fuel consumption. In this thesis, first, different kind of electrical hybrid cars and power transmission in this sort of cars are investigated. Then, an engine in hybrid and electrical car-based on former studies-considered and all fundamental criteria are compared. Subsequently, the car was molded in Advisor software and after validation of our model, with the regard of the superiority of parallel hybrid systems, a parallel hybrid system employed to study hybrid systems. After analyzing influential parameters on hybrid car performance, in order to gain the lowest fuel consumption as well as maintaining dynamic performance of the car, PSO algorithm used to optimize significant parameters. Eventually, the fuel consumption reduced by sixteen percent. It is also noted that in the case of urban electricity usage in first twelve kilometers a forty percent increase in efficiency can be achieved. In another case, where in addition to power system, transmission system was optimized a five more percent in reduction can be reach which sums up to twenty one percent reduction in fuel consumption.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.