

طراحی بهینه جعبه دنده خودرو بر اساس شاخصهای عملکرد و مصرف سوخت

ابوالفضل معصومی^{۱*}، مسعود شریعت پناهی^۲ و علیرضا معتمدی^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۳/۳۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۱/۱۹، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

چکیده

در این مقاله، هدف طراحی جعبه دنده خودرو است به طوریکه شاخصهای مصرف سوخت و عملکرد خودرو در حالت بهینه خود قرار گیرند. بنابراین ابتدا شاخصهای مهم، در انتخاب سیستم انتقال قدرت مناسب، برای یک موتور معین، معرفی و مدلسازی می شود و به منظور ارزیابی و حصول اطمینان از مناسب بودن مدل ارائه شده، مدل پیشنهادی برای یک نوع گیربکس پنج دنده دستی و یک نوع موتور بنزینی 1600CC اجرا و نتایج بدست آمده، برای شاخصهای عملکرد، نظیر شتابگیری، سرعت ماکزیمم، نقاط بهینه تعویض دنده، شیب روی، اختلاف از توان ایده آل موتور و مصرف سوخت با نتایج تجربی مقایسه می گردد. بعد از انتخاب شاخصهای موثر، نیاز به تصمیم گیری برای انتخاب گیربکس مناسب می باشد به طوریکه مصرف سوخت و عملکرد خودرو را همزمان ارضاء کند. به همین جهت الگوریتم بهینه سازی عملکرد و مصرف سوخت خودرو، بعنوان معیاری برای این انتخاب، مدل سازی می شود به طوریکه خروجی این الگوریتم نسبت دنده های دوم، سوم و چهارم گیربکس می باشد.

واژه های کلیدی: گیربکس - موتور - بهینه سازی - عملکرد خودرو - مصرف سوخت

مقدمه

تلاشهایی در زمینه مدل سازی و بهینه کردن عملکرد خودرو در سالهای اخیر انجام شده است به عنوان مثال ساید و دانگ سون به بهینه کردن عملکرد خودرو با در نظر گرفتن مصرف سوخت و زمان رسیدن به سرعت 100km/h پرداخته اند [۱]. با توجه به این که عملکرد خودرو در سرعتهای دیگر نیز دارای اهمیت است، بنابراین در نظر گرفتن این بازه سرعت، به تنهایی کافی نمی باشد زیرا این دامنه در خودروهای امروزی، فقط رفتار دنده یک، دو و بازه های از دنده سه را پوشش می دهد. جیان فنگ نیز یک الگوریتم برای بهینه سازی عملکرد خودرو ارائه کرده است و به همراه مصرف سوخت، نیروی پیشران خودرو را در محاسبات خود مورد توجه قرار داده است [۲]. نتیجه محاسبات، کاهش مصرف سوخت و عدم تغییر در عملکرد خودرو، مانند شتابگیری بوده است. در این روش سایر شاخصهای عملکرد خودرو در نظر گرفته نشده است. جان سیرل نیز معادلاتی برای محاسبه زمان و مسافت در حالت شتابگیری ماکزیمم ارائه نموده است [۳]. دورعلی به

در دهه اخیر صنعت خودرو سازی در ایران مسیر رو به رشدی را طی می کند یکی از مسائل مهم در جهانی شدن صنعت خودرو علاوه بر مسائل تکنولوژیکی مسائل اقتصادی است و این موضوع باعث راه یافتن به سمت تفکر استفاده از پلتفرم مشترک برای خودروهای تولیدی گردیده است. از موارد مورد توجه در این مورد تنوع در محصولات است که می توان با در نظر گرفتن قوای محرکه گوناگون برای یک پلتفرم همسان به این هدف دست یافت. اما انتخاب قوای محرکه برای یک خودرو تأیید پارامترهای گوناگونی را می طلبد که یکی از این موارد همخوانی موتور و گیربکس برای داشتن بیشترین عملکرد و مصرف بهینه سوخت است. از موارد مورد مثال می توان به آزمون دو نوع گیربکس از لحاظ عملکرد برای قرارگیری در کنار موتور بنزینی خودروی پژو داخل کشور ایران اشاره کرد. در واقع هدف انتخاب گیربکسی بود که پارامترهای عملکردی مانند سرعت ماکزیمم، شتاب گیری، شیب روی و ... را ارضاء نماید.

- بررسی صحت طراحی با توجه به نیازهای عملکردی خودرو
- مقدار سرعت خودرو بر حسب زمان که معرف شتاب نیز میباشد، در شکل (۱) برای دنده یک و دنده دو به عنوان نمونه رسم شده است.

شتاب در سبقت گیری^۳

برای مقایسه حس رانندگی در شتابگیری، برای مدل های مختلف قوای محرکه، شتابگیری در هر دنده به تنهایی برای پیش داوری کافی نمی باشد. به عنوان مثال زمان شتابگیری برای تغییر سرعت از V1 به V2 برای خودرویی که با سرعت ثابت V1 در حال حرکت است نسبت به حالت شتابگیری در هر دنده متفاوت خواهد بود. این موضوع در سبقت گیری خودروها از یکدیگر بسیار حائز اهمیت میباشد. سرعتهایی که در این حالت اندازه گیری می شوند عبارتند از:

- زمان شتاب گیری برای تغییر سرعت $40-70(Km/h)$ با دنده ۲
- زمان شتاب گیری برای تغییر سرعت $70-110(Km/h)$ با دنده ۳
- زمان شتاب گیری برای تغییر سرعت $110-140(Km/h)$ با دنده ۴

شتاب بین دنده ای^۴

مواردی که در این روش اندازه گیری میشوند عبارت است از:

- زمان برای طی مسافت 400m
- زمان برای طی مسافت 1000m
- زمان شتابگیری برای تغییر سرعت از 0-100Km/h

سرعت ماکزیمم و دور نهایی موتور

سرعت ماکزیمم، شاخصی موثر در انتخاب قوای محرکه گوناگون می باشد، سرعت ماکزیمم در سبکترین دنده، زمانی حاصل میشود که مقدار منتهی نیروهای وارد بر خودرو صفر گردد؛ از اشتباهات رایج برای محاسبه این سرعت، استفاده از دور استپ موتور می باشد. اگر یک موتور با دو گیربکس متفاوت به سرعت نهایی تقریباً یکسان برسند؛ در مجموعه ای که دور موتور پایین تر است سرو صدا کمتر، دمای موتور پایین تر و عمر مجموعه بالاتر خواهد بود و تاکید نویسنده به بررسی این دو شاخص توأمان می باشد.

انتخاب قوای محرکه با مدل سازی به روش بانداگراف پرداخته است البته وی نسبت به سایر محققین، پارامترهای مؤثر را به صورت جامع تر ارائه نموده است، اما مدلی برای محاسبه مصرف سوخت ارائه نکرده است.

همان گونه که از بررسی فوق مشاهده می شود، هر یک از تحقیقاتی که تا کنون در این زمینه صورت گرفته، به بررسی بخشی از شاخصهای عملکرد خودرو پرداخته است ولی تاکنون مدلی که در بر گیرنده کلیه شاخصهای واقعی و مطرح در صنعت خودرو شامل شتابگیری، شیب روی، سرعت ماکزیمم، دور موتور، اختلاف از توان ایده ال موتور و مصرف سوخت باشد در ادبیات پژوهشی گزارش نشده است. در پژوهش حاضر، مدل کاملی که در برگزیده همه این شاخص ها است ارائه و تحلیل شده است و از این طریق یک روش سیستماتیک برای محاسبه مقادیر تک تک این شاخص ها ارائه شده است. از آنجا که مقایسه شاخص های فوق الذکر به صورت جداگانه، مبنای مناسبی برای قضاوت در مورد مطلوبیت یک جعبه دنده بدست نمی دهد. در ادامه این پژوهش، یک معیار کلی که در برگزیده تمامی این شاخص ها به طور همزمان است معرفی شده و کد کامپیوتری لازم برای محاسبه این معیار کلی نیز تدوین شده است. استفاده از این کد کامپیوتری، طراح را قادر می سازد از میان شاخصهای گوناگون، با توجه به خواسته و اهداف مطالعاتی خود تعدادی را در تابع هدف بکار گیرد و مورد بررسی قرار دهد.

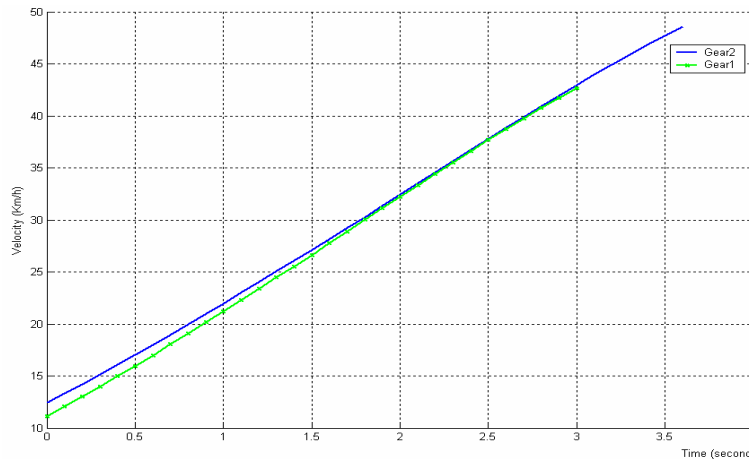
در ادامه به معرفی شاخصهای ارزیابی عملکرد خودرو پرداخته می شود [۴].

شتاب گیری^۱

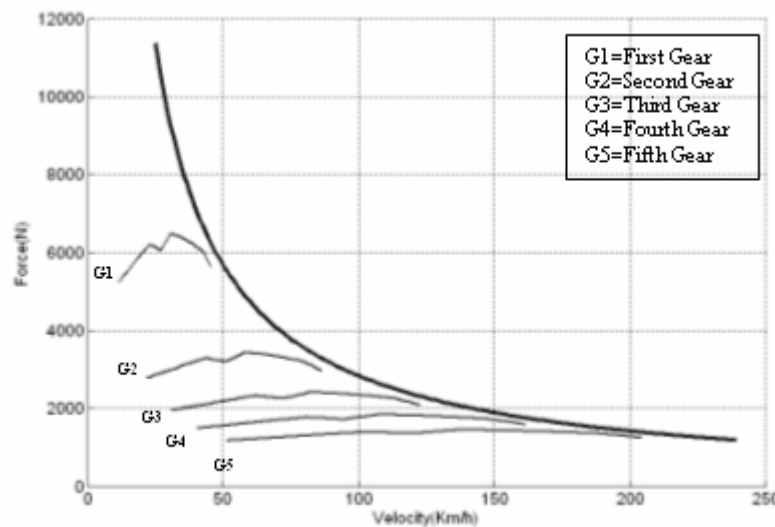
شتاب در هر دنده^۲

نیروی پیشران خودرو با توجه به نسبت دنده انتخابی به هنگام تعویض دنده، متفاوت است بهمین جهت برای هر دنده، مقدار این نیرو به ازای سرعتهای لحظه ای مختلف خودرو محاسبه میشود. در این حالت موتور در حالت باردهی کامل میباشد. نتایجی که از این محاسبات بدست می آید عبارت است:

- مقایسه شتاب دنده های مشابه دو گیربکس متفاوت
- یافتن نقطه تعویض دنده مناسب در حالت شتابگیری ماکزیمم



شکل ۱: منحنی سرعت-زمان در دنده یک و دنده دو.



شکل ۲: منحنی اختلاف از توان ایده آل.

شیب روی

دو مورد معمولاً "در شیب روی در نظر گرفته می شود [۶] قابلیت شروع به حرکت خودرو با بار در شیب حداقل ۳۳٪ قابلیت دستیابی به سرعت ۸۸-۹۶ Km/h در شیب حداقل ۳٪ و سبکترین نسبت دنده

انحراف از توان ایده آل

ایده آلتین حالت برای خودرو داشتن توان ماکزیمم موتور در دورهای مختلف می باشد یعنی

$$P_{\max} = T \cdot \omega \quad (1)$$

که ω دور موتور و T گشتاور آن میباشد. بنابراین منحنی نیرویی موتور در حالت توان ایده آل مطابق با شکل (۲) به صورت سهمی است حال با اضافه کردن منحنی های مربوط به دنده های مختلف، اختلاف

مصرف سوخت

- محاسبه مصرف سوخت به دو صورت انجام می شود
- اندازه گیری مصرف سوخت در سیکل شهری و خارج از شهری
- اندازه گیری مصرف سوخت در سرعت های ثابت ۹۰, ۱۲۰ Km/h

میزان آلاینده‌گی

میزان آلاینده ها در انتخاب قوای محرکه بسیار موثر است آلاینده های مورد بررسی NOx, HC, CO و ذرات معلق دیگر میباشد در ایران نیز آلاینده ها بر اساس استانداردهای اروپایی مورد بررسی قرار می گیرد از مقیاسهای Euro1, Euro2, Euro3, Euro4 برای مقایسه میزان آلاینده‌گی استفاده می شود.

جرم موثر

برای معادل سازی اینرسی های دورانی به صورت اینرسی خطی از روابط تجربی مانند معادله زیر استفاده میشود [۷].

$$M_e = m[1 + 0.04 + 0.0025N_{ff}^2] \quad (۶)$$

به طوریکه m جرم خودرو، M_e جرم موثر، N_{ff} حاصلضرب نسبت دنده گیربکس و دیفرانسیل میباشد.

نیروهای عمود بر سطح

نیروهای طولی بر روی چرخها به نیروی نرمال وابسته است نیروهای نرمال تابع جرم خودرو و شتاب آن برای حرکت در راستای طولی می باشد [۷].

$$F_{z1,2} = \frac{mgl_r}{2L} - \frac{ma_x \times h}{2L} \quad (۷)$$

$$F_{z3,4} = \frac{mgl_f}{2L} + \frac{ma_x \times h}{2h} \quad (۸)$$

به طوریکه $F_{z3,4}$ ، $F_{z1,2}$ نیروی عمود بر سطح چرخهای جلو و عقب، L فاصله محور عقب و جلو، l_r فاصله گرانیگاه تا محور عقب، l_f فاصله گرانیگاه تا محور جلو، a_x شتاب طولی خودرو و h ارتفاع گرانیگاه میباشد.

معادلات تایلر

با توجه به نتایج آزمایشگاهی نیروهای تایلر به صورت غیر خطی مطابق با لغزش و زاویه لغزش تغییر می کند در این مطالعه مدل پچکا برای محاسبه نیروهای طولی استفاده می شود. این نیرو وابسته به نیروهای نرمال و شرایط جاده ای می باشد.

$$Q_x = (1 - E_x)(\lambda + sh_x) + \frac{E_x}{B_x} Tg^{-1}(B_x(\lambda + sh)) \quad (۹)$$

$$F_x = M_x D_x \sin(C_x Tg^{-1}(B_x Q_x)) + SV_x \quad (۱۰)$$

که در معادلات بالا $C_x, B_x, SV_x, sh_x, D_x, E_x$ فاکتورهای مربوط به تایلر و λ ضریب لغزش و F_x نیروی طولی می باشد.

با حالت ایده آل قابل ملاحظه است کمتر شدن این اختلاف نزدیک شدن به حالت ایده آل است بنابراین داشتن یک جعبه دنده با بی نهایت نسبت دنده بهترین است و همین ایده باعث شکل گیری گیربکسهای CVT شده است.

زمان تعویض دنده

زمان تعویض دنده از محل تلاقی منحنی نیرویی دندها بدست می آید، شکل (۲)، در صورت عدم تقاطع، برای داشتن بیشترین شتابگیری، دور تعویض دنده، نزدیک به دور استپ موتور خواهد بود بنابراین تعویض دنده بدون شوک و نرم نخواهد بود و مصرف سوخت و آلایندگی بالاتر میرود.

معادلات خودرو

معادله حرکت در راستای طولی (محور x):

برای خودرو به صورت زیر است:

$$M_e \frac{d^2x}{dt^2} = F_x - R_a - R_{rr} - R_{rf} \quad (۲)$$

به طوری که M_e جرم موثر خودرو، F_x نیروی پیشران، R_a نیروی مقاوم آیرودینامیکی و R_{rr} ، R_{rf} نیروی مقاوم غلطشی تایرهای جلو و عقب میباشد.

 R_a (نیروی مقاوم آیرودینامیکی)

که ناشی از مقاومت هوا در برابر خودرو است و رابطه آن به صورت زیر است:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho . A . C_d . V^2 \quad (۳)$$

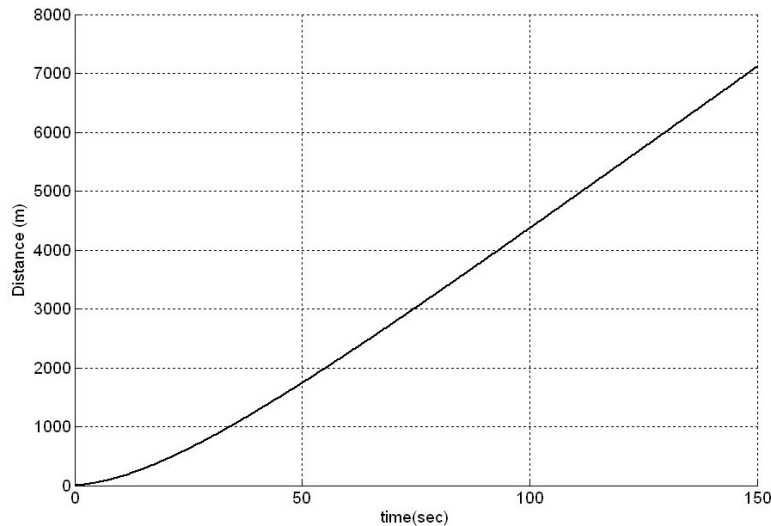
که در این رابطه ρ چگالی هوا، C_d ضریب مقاومت آیرودینامیکی، A سطح مقطع جلوی خودرو و V سرعت آن می باشد.

 $R_{rf,r}$: نیروی مقاوم غلطشی تایلر

که با رابطه زیر مشخص میشود که در آن M_r ضریب اصطکاک غلطشی تایلر و m_r, m_f جرم روی اکسلهای جلو و عقب می باشند.

$$R_r = m_r g . M_r \quad (۴)$$

$$R_f = m_f g . M_r \quad (۵)$$



شکل ۳: منحنی مسافت- زمان در دنده های مختلف.

طولی و ترمزی به لغزش وابسته هستند. لغزش طبق رابطه زیر مشخص میشود [۸].

$$\lambda = \frac{rw - v}{\max(rw, v)} \quad (13)$$

$$rw > v \Rightarrow \lambda = \frac{rw - v}{rw} \quad (14)$$

$$rw < v \Rightarrow \lambda = \frac{rw - v}{v} \quad (15)$$

که در معادلات بالا w, v, r به ترتیب شعاع تایر، سرعت طولی و سرعت دورانی چرخ می باشند.

معادلات مصرف سوخت

مصرف سوخت در خودرو وابسته به پارامترهای گوناگون است که عبارتند از: خصوصیات مصرف سوخت موتور، خصوصیت سیستم انتقال قدرت، وزن خودرو، مقاومت آیرودینامیکی، مقاومت غلطشی تایرها، سیکل رانندگی، رفتار راننده و وضعیت جاده. محاسبه مصرف در حالت گذار نیاز به داشتن اطلاعات مربوط به رفتار موتور در این حالت دارد معادلات حاکم عبارتند از [۹]:

$$C_r = F_r \frac{D}{2} \quad (16)$$

که F_r نیروی کشنده مورد نیاز، C_r گشتاور مورد نیاز و D قطر چرخ می باشد.

گشتاور خروجی موتور T_e [Nm] از رابطه زیر محاسبه

معادلات چرخ

با بکارگیری قانون دوم نیوتون برای حالت شتاب گیری، معادله حرکت چرخ ها با توجه به نیروی مقاوم غلطشی به صورت زیر خواهد بود [۸].

$$(I_w)(\dot{\omega}) = -F_x \times r + T_{roll} + T_{engine} \quad (11)$$

که I_w گشتاور اینرسی چرخ، $\dot{\omega}$ شتاب زاویه ای چرخ، F_x نیروی پیشران، T_{roll} گشتاور مقاوم غلطشی، T_{engine} گشتاور تولیدی موتور و r شعاع دینامیکی چرخ می باشد.

گشتاور اینرسی چرخ زمانی که چرخ از طریق توان انتقال یافته به آن به موتور متصل می شود با شرایطی که آزادانه دوران می کند متفاوت است در خلال شتاب گیری اینرسی چرخ طبق معادله ۱۱ مشخص می شود. در بقیه شرایط فقط گشتاور اینرسی چرخ بدون ملاحظه اینرسی سایر قسمتهای دوار برای معادلات به کار برده می شود.

$$I_w = I_t + I_e \frac{R^2}{2} \quad (12)$$

I_w : گشتاور اینرسی چرخ، I_t گشتاور اینرسی انتقال قدرت، I_e گشتاور اینرسی موتور و R نسبت دنده است.

معادلات لغزش (λ)

دامنه لغزش -1 تا $+1$ می باشد و $\lambda = -1$ بدین معنا است که چرخها کاملاً در حال ترمز گیری قفل هستند و $+1$ حالتی است که چرخها آزادانه دوران میکنند. نیروهای

رانندگی، رانندگان خودرو ارضا نشوند. بنابراین بهترین راه، انتخاب نسبت دنده‌هایی می‌باشد که در حالت بهینه خود قرار داشته باشند یعنی هم شتابگیری و هم مصرف سوخت دارای مقادیر قابل قبولی باشند

انتخاب الگوریتم مناسب

در این قسمت روش باکس^۵ و یا کامپلکس^۶ متد انتخاب شد. این روش برای حل مسائل مقید مانند مطالعه انجام شده کاربرد دارد.

انتخاب متغیرهای مسأله

متغیرهای مسأله در الگوریتم بهینه‌سازی نسبت دنده‌های میانی گیربکس می‌باشند که بین دو حد بالایی و پایینی محصور می‌شوند دنده یک بر حسب شیب روی و سبکترین دنده، یعنی دنده پنج بر حسب سرعت ماکزیمم انتخاب می‌شود

انتخاب اولین سری نسبت دنده

به عقیده مهندسان طراح در زمینه عملکرد خودرو، تجربه و شناخت در مورد نسبت دنده‌های گیربکس کمک شایانی به راحتتر شدن حل مسأله می‌کند. یعنی طراح با شناختی که نسبت به موتورهای همکلاس موتور معین خودرو و سیستم‌های انتقال قدرت مناسب آنها دارد؛ حدس اولیه خود را برای انتخاب اولین سری نسبت دنده‌ها نزدیک به جواب مسأله انتخاب می‌کند این امر باعث کم شدن حجم محاسبات و دسترسی سریع‌تر به جواب مسأله می‌شود. انتخاب اولین سری نسبت دنده برای حل مسأله به روش باکس ضروری می‌باشد.

انتخاب حدود بالا و پایین نسبت دنده‌ها

با معلوم بودن حدس اولیه، این دامنه طوری انتخاب شد که نسبت دنده‌های نهایی دارای مقادیر غیر واقعی و غیر عملی نباشند و در محدوده متعارف حاصلضرب نسبت دنده‌های گیربکس و دیفرانسیل باشد. همچنین در این مرحله این قید در نظر گرفته شد که مقدار g_i همواره میان g_{i-1} ، g_{i+1} باشد. یعنی:

$$g_1 < g_2 < g_3 < g_4 < g_5 \quad (21)$$

$$0.1114 < g_1 < 0.16064 \quad (22)$$

می‌شود.

$$T_e = \frac{C_r}{r_s r_a} \quad (17)$$

که r_s نسبت جعبه دنده و r_a نسبت دیفرانسیل می‌باشد. سرعت دورانی موتور $\omega_e [rad/s]$ برابر است با:

$$\omega_e = \frac{V}{\eta D} r_s r_a \quad (18)$$

η راندمان مکانیکی سیستم و V سرعت طولی خودرو می‌باشد.

P_{me} فشار میانگین موثر پیستون طبق رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$P_{me} = T_e \frac{4\pi}{V_c} \quad (19)$$

به طوری که $V_c [m^3]$ گنجایش موتور می‌باشد. با داشتن دور موتور و همچنین فشار میانگین موثر پیستون و مراجعه به منحنیهای مشخصه مصرف سوخت موتور، مصرف ویژه سوخت $Sfc [gr/(kwh)]$ قابل محاسبه است.

با داشتن گشتاور تولیدی و دور موتور، EOE(KWH)، توان خروجی موتور، محاسبه می‌شود. بنابراین مصرف سوخت بر حسب گرم برای هر مرحله و هر سرعت از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$F_c = Sfc \cdot EOE \frac{0.1}{3600} \quad (20)$$

الگوریتم انتخاب بهینه نسبت دنده‌های

گیربکس

در بخش (۲)، شاخصهای ارزیابی عملکرد خودرو معرفی و مدل شد. بعد از این محاسبات، مرحله بعدی، انتخاب نسبت دنده مناسب گیربکس، برای یک موتور معین است. سؤال اساسی چگونگی انتخاب با توجه به مقادیر بدست آمده می‌باشد. شتابگیری و مصرف سوخت خودرو، دو شاخصی می‌باشند که در جهت عکس یکدیگر در حال حرکت هستند بدین معنا که اگر نسبت دنده‌های سیستم انتقال قدرت طوری انتخاب شوند که شتابگیری خودرو تا حد بالایی بهبود یابد در این صورت ممکن است مصرف سوخت خودرو تا حد قابل توجهی افزایش پیدا کند و یا بالعکس توجه به اقتصاد سوخت ممکن است تأثیری معکوس در شتابگیری داشته باشد و از لحاظ حس

بطوریکه α ضریب ارزش دهی شاخص،
 $t_{0-100}, t_{40-80}, t_{60-100}, t_{80-120}$ زمان تغییر سرعت بین
 مقادیر اندیسه‌های t همچنین t_{400}, t_{1000} زمان برای طی
 مسافت‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ متر می باشد.

$$0.16832 < g2 < 0.2175 \quad (23)$$

$$0.22784 < g3 < 0.3091 \quad (24)$$

معرفی تابع هدف

در این مرحله شاخصهای ارزیابی عملکرد و مصرف سوخت خودرو که در بخشهای پیشین معرفی شده بودند به صورت نرمال، وزن دهی و وارد تابعی شدند که هدف، کمینه کردن آن بود. انتخاب این شاخصها به روشهای گوناگون امکان پذیر می باشد که در ادامه بعضی از این انتخابها معرفی میشود.

انتخاب شاخصهای ترکیبی

در این حالت، شاخصهای عملکردی مانند حالت قبلی می باشد و فقط شاخص مصرف سوخت حذف شده است.

انتخاب اختلاف از توان ایده آل موتور

در این حالت تنها پارامتری که برای کمینه کردن تابع هدف به کار گرفته شد اختلاف از توان ایده آل موتور بود. بنابراین تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$f = P_d \quad (25)$$

که P_d مقدار نرمال شده این اختلاف می باشد.

انتخاب زمان شتابگیری t_{0-100}

یکی از پارامترهای بسیار مهم در خودرو زمان شتاب گیری از سرعت صفر تا صد می باشد به همین خاطر این پارامتر به صورت جداگانه بررسی شد. تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$f = t_{0-100} \quad (26)$$

انتخاب شاخصهای ترکیبی و مصرف سوخت

در این حالت چند شاخص عملکرد خودرو به همراه مصرف سوخت در تابع هدف در نظر گرفته میشوند. ضرایب ارزش دهی شاخصها براساس تجربیات حاصل از تستهای حسی خودرو قرار داده شده بنابراین ارزش شاخص مصرف سوخت، 2α ، نسبت به سایر شاخصها بالاتر و مقدار عددی α برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. بنابراین تابع هدف به صورت زیر خواهد بود.

$$f = 2\alpha \cdot fuel + \alpha \cdot t_{0-100} + \alpha \cdot t_{40-80} + \alpha \cdot t_{60-100} + \alpha \cdot t_{80-120} + 0.5\alpha \cdot t_{400} + 0.5\alpha \cdot t_{1000} \quad (27)$$

تحلیل نتایج

نتایج حاصل از تست واقعی و مدل سازی عملکرد و

مصرف سوخت

به منظور ارزیابی و حصول اطمینان از مناسب بودن مدل پیشنهادی برای شبیه سازی عملکرد و مصرف سوخت خودرو، این مدل برای یک گیربکس پنج دنده دستی و یک موتور بنزینی اجرا و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تست خودروی واقعی مقایسه گردید. در جدول (۱) سرعت ماکزیمم و زمان رسیدن به سرعت ماکزیمم برای دنده‌های ۱ تا ۴ گنجانده شده است؛ این مقادیر دارای دقت خوبی هستند. همچنین در جدول (۲) میزان وزن قابل حمل توسط خودرو گنجانده شده است و همان طور که قابل ملاحظه است با افزایش شیب مسیر از این وزن کاسته می شود. در جدول (۳) شاخصهای مهم عملکرد و مصرف سوخت گنجانده شده است. در جدول (۴) زمان شتابگیری بین سه دامنه از سرعت گنجانده شده است این سه دامنه عبارتند از:

- زمان تغییر سرعت از 40-80 km/h در دنده ۳
- زمان تغییر سرعت از 60-100 km/h در دنده ۳
- زمان تغییر سرعت از 80-120 km/h در دنده ۴

همچنین در جدول (۵) زمان شتابهای بین دنده‌ای مانند زمان طی مسافت ۴۰۰ متر، ۱۰۰۰ متر و تغییر سرعت از ۰-۱۰۰ km/h ثبت و در شکل (۳) منحنی مسافت-زمان خودرو در دنده های مختلف رسم شده است.

جدول ۱: مقایسه زمان شتابگیری در دنده های مختلف برای محاسبات مدل سازی و نتایج تست خودروی واقعی.

نتایج تست	نتایج محاسبات	نوع موتور: بنزینی نوع گیربکس: پنج دنده	
		۴۶	۴۶
۴	۳/۸۰	زمان (sec)	
۸۴	۸۴	سرعت ماکزیم (km/h)	دنده ۲
۱۰	۹/۱۰	زمان (sec)	
۱۲۳	۱۲۲	سرعت ماکزیم (km/h)	دنده ۳
۲۱	۱۹	زمان (sec)	
۱۶۵	۱۶۴	سرعت ماکزیم (km/h)	دنده ۴
۴۴	۴۱	زمان (sec)	

جدول ۲: شیب روی

شیب	۸٪	۱۲٪	۱۶٪	۲۰٪
حداکثر وزن قابل حمل kg	۳۵۲۹	۲۰۰۶	۱۲۶۵	۶۵۰

جدول ۳: نتایج مقادیر عملکرد و مصرف سوخت خودرو برای محاسبات مدل سازی و نتایج تست خودروی واقعی

نتایج تست	نتایج محاسبات	نوع موتور: بنزینی نوع گیربکس: پنج دنده	
		۱۸۰	۱۸۵
۶۲۵۰	۶۲۵۰	rpm	دور موتور در سرعت نهایی
۶۲۵۰	۶۲۵۰	rpm	دور موتور برای تعویض دنده
-	۲/۲۲۷۲	-	اختلاف از توان ایده ال موتور
۶/۸	۷/۲	l/100 km	مصرف سوخت در سرعت ۹۰
۹/۲	۹/۸	l/100 km	مصرف سوخت در سرعت ۱۲۰

جدول ۴: محاسبات زمان سبقت گیری برای محاسبات مدل سازی و نتایج تست خودروی واقعی.

نتایج تست	نتایج محاسبات	نوع موتور: بنزینی نوع گیربکس: پنج دنده	
		۷/۵	۷
۸/۲	۷/۸	زمان (Sec)	۶۰-۱۰۰ Km/h با دنده ۳
۱۱/۸۵	۱۰/۸	زمان (Sec)	۸۰-۱۲۰ Km/h با دنده ۴

جدول ۵: محاسبات زمان شتابگیری بین دنده ای برای محاسبات مدل سازی و نتایج تست خودروی واقعی

نتایج تست	نتایج محاسبات	نوع موتور: بنزینی نوع گیربکس: پنج دنده	
		۱۸/۷۳	۱۹
۳۷/۵	۳۵	زمان (Sec)	مسافت ۱۰۰۰ m
۱۳	۱۳/۷	زمان (Sec)	۰-۱۰۰ Km/h

نتایج حاصل از الگوریتم بهینه سازی

این نتایج دربرگیرنده چهار حالت ذکر شده در بخش ۳ در انتخاب شاخصها برای تابع هدف می باشند که عبارتند از:

- انتخاب زمان تغییر سرعت از صفر تا صد کیلومتر به عنوان شاخص
- انتخاب اختلاف از توان ایده ال موتور به عنوان شاخص

۳- انتخاب شاخصهای ترکیبی عملکرد که شامل موارد زیر است:

- زمان تغییر ساعت از صفر تا صد کیلومتر
- زمان تغییر سرعت از 40-80 km/h
- زمان تغییر سرعت از 60-100 km/h
- زمان تغییر سرعت از 80-120 km/h
- زمان برای طی مسافت 400,1000 m

جدول ۶: مقادیر عملکرد و مصرف سوخت برای حالت‌های مختلف انتخاب شاخص در تابع هدف. حالت اول (شاخص ۱۰۰-۰)، حالت دوم (اختلاف از توان ایده ال)، حالت سوم (شاخصهای ترکیبی عملکرد)، حالت چهارم (شاخصهای ترکیبی عملکرد و مصرف سوخت).

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	نوع موتور: بنزینی	
				نوع گیربکس: پنج دنده	زمان (Sec)
۲۰/۰۲	۲۱/۰۱	۱۹/۶۹	۲۱	مسافت ۴۰۰ m	زمان (Sec)
۳۵/۷	۳۵/۳۳	۳۵/۳۷	۳۶/۸۷	مسافت ۱۰۰۰ m	زمان (Sec)
۴۶/۴۸	۴۶/۵۴	۴۶/۵۵	۴۸/۵۵	مسافت ۱۵۰۰ m	زمان (Sec)
۵/۸۶	۵/۹۸	۶/۱۶	۶/۷۶	۴۰-۸۰ Km/h	زمان (Sec)
۷/۲۶	۷/۴۲	۷/۴۷	۷/۹۷	۶۰-۱۰۰ Km/h	زمان (Sec)
۹/۴	۹/۶۸	۹/۲۸	۹/۹۵	۸۰-۱۲۰ Km/h	زمان (Sec)
۱۳/۹	۱۳/۹	۱۴/۳	۱۵/۲	۰-۱۰۰ Km/h	زمان (Sec)
۸/۲۹	۸/۱	۷/۶۷	۷/۱	مصرف سوخت در سرعت ۹۰	l/100 km
۱۰/۸۸	۱۰/۷۱	۱۰/۱۲	۹/۷۵	مصرف سوخت در سرعت ۱۲۰	l/100 km
۱۱/۴۹	۱۱/۳۸	۱۱/۰۸	۱۰/۲۵	مصرف سوخت در سیکل اروپایی	l/100 km
-	۵/۰۱۴۰	۵/۰۲۸۶	۵/۰۳۰۰	اختلاف از توان ایده ال موتور	-

جدول ۷: نسبت دنده های نهایی (گیربکس و دیفرانسیل) حالت‌های مختلف انتخاب شاخص در تابع هدف. حالت اول (شاخص ۱۰۰-۰)، حالت دوم (اختلاف از توان ایده ال)، حالت سوم (شاخصهای ترکیبی عملکرد)، حالت چهارم (شاخصهای ترکیبی عملکرد و مصرف سوخت).

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	شماره دنده
۰/۱۲۴۵	۰/۱۱۱۴۱	۰/۱۳۸۰	۰/۱۴۰۱	۲
۰/۱۶۸۳۲	۰/۱۶۸۳۲	۰/۱۹۸۹	۰/۲۱۰۶	۳
۰/۲۲۷۸۴	۰/۲۵۳۴۴	۰/۲۷۲۴	۰/۲۹۴۴	۴

حالت دوم مربوط به انتخاب اختلاف توان تولیدی موتور، از توان ایده‌ال آن به عنوان شاخص عملکرد در الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. با ملاحظه نسبت دنده‌های بدست آمده حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی در حالت دوم، مشخص است که مقادیر نسبت دنده‌های ۲ و ۳ به مقدار حدی خود رسیده‌اند در حالیکه دنده چهارم با مقدار حد پایین خود فاصله دارد. بنابراین مشخص است که دنده‌های سنگین‌تر، اثر بیشتری نسبت به دنده‌های سبک‌تر در کمینه کردن مقدار اختلاف از توان ایده‌ال موتور دارند. با مراجعه به جدول (۶) و مقایسه عملکردی خودرو در حالت دوم و سوم (شاخصهای ترکیبی) قابل ملاحظه است که نزدیک شدن به توان ایده‌ال موتور لزوماً به معنای دستیابی به بهترین نسبت دنده در گیربکس‌های دستی نمی‌باشد هدف کلی از ایجاد الگوریتم بهینه‌سازی دستیابی به مقادیر نسبت دنده‌هایی از گیربکس است که مقدار مصرف سوخت و عملکرد خودرو در حالت بهینه قرار داشته باشند. به همین جهت حالت‌های سوم و چهارم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در حالت سوم شاخصهای به کاررفته در تابع هدف مجموعه‌ای از شاخصهای عملکردی می‌باشند و در حالت چهارم شاخص‌های به کار رفته در تابع هدف شامل

۴- انتخاب شاخصهای ترکیبی عملکرد و مصرف سوخت خروجی الگوریتم بهینه‌سازی مصرف سوخت و عملکرد خودرو، نسبت، دنده‌های نهایی دو، سه و چهار مجموعه گیربکس و دیفرانسیل می‌باشد و نسبت دنده‌های یک و پنج با توجه به شیب پیمایی و رسیدن به سرعت ماکزیمم معین، انتخاب شده‌اند. در جدول (۷) مقادیر نسبت دنده‌های حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی گنجانده شده است. حالت اول مربوط به انتخاب زمان صفر تا صد به عنوان شاخص عملکرد در الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. هدف از بررسی این شاخص در تابع هدف مطالعه اثر آن بر مقادیر نسبت دنده‌های حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. قبل از بدست آمدن نتایج، این حدس مطرح بود که با تعیین حد بالا و پایین در بخش ۳-۳ برای نسبت دنده‌های گیربکس در الگوریتم بهینه‌سازی ممکن است مقادیر نسبت دنده‌های حاصل، برابر با حد پایینی خود شوند. اما این گونه نشد زیرا با سنگین شدن یک نسبت دنده با این که شتاب تولیدی بالا می‌رود اما دامنه کمتری از سرعت خودرو پوشش داده می‌شود و نیاز به تعویض دنده می‌باشد.

- الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت خودرو مناسب بود و به خوبی برای حل این مسأله همگرا می‌گردد.
- اگرچه انتخاب شاخص مصرف سوخت خودرو، در تابع هدف، در نهایت باعث کاهش مقدار شاخصهای عملکردی خودرو می‌گردد اما با توجه به بهبود مصرف سوخت و ارزش بالای این شاخص، افت مقدار شاخصهای عملکردی خودرو قابل اغماض می‌باشد.
- با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی برای کمینه کردن اختلاف توان تولیدی با توان ایده‌ال موتور، در گیربکس‌های دستی، توان تولیدی در دنده‌های سنگین‌تر به توان ایده‌ال نزدیک می‌شود و در تمام دنده‌ها مانند گیربکس پیوسته این اتفاق نمی‌افتد.

تشکر و قدردانی

با سپاس و تشکر از مرکز تحقیقات گروه صنعتی ایران خودرو که در تکمیل این مطالعه نویسندگان را یاری فرموده‌اند.

شاخص‌های حالت سوم به‌مراه شاخص مصرف سوخت می‌باشد. همان‌طور که از نتایج جدول (۶) مشخص است حالت چهارم نسبت به سایر حالتها از لحاظ مصرف سوخت بهترین است ولی عملکرد خودرو در این حالت کاهش پیدا کرده است. اما این میزان کاهش با توجه به بهبود مصرف سوخت خودرو قابل اغماض است. همچنین در حالت سوم مصرف سوخت نسبت به دو حالت اول بهبود یافته است. با توجه به نتایج ذکر شده این نکته قابل استنباط است که در نظر گرفتن شاخصهای ترکیبی عملکرد در تابع هدف باعث بهبود مصرف سوخت می‌شود و در صورتیکه شاخص مصرف سوخت نیز گنجانده شود می‌توان به نسبت دنده‌هایی دست یافت که مصرف سوخت کاهش پیدا کند و عملکرد خودرو افت چندانی نداشته باشد.

جمع بندی

از نتایج قابل اشاره در این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- از شاخصهای اندازه‌گیری شده در تابع هدف شتاب صفر تا صد و اختلاف از توان ایده‌ال موتور اثری تقریباً یکسان بر روی عملکرد و مصرف سوخت خودرو دارند.

مراجع

- 1 - Mohame El-Sayed and Dong Song, (1998). "Automotive performance optimization." *Transmission and Driveline Symposium, SAE Technical*, paper series: 980825.
- 2 - HE Ren and Wang Jian Feng. (1999). "Interval optimization of automobile transmission parameters." *Transmission and Driveline Symposium, SAE Technical*, paper series: 1999-01-0733.
- 3 - John Searle. (1999). "Equation for speed, time distance for vehicle under maximum, acceleration." *Transmission and Driveline Symposium, SAE Technical* paper series:1999-01-0078.
- 4 - Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground Vehicle*. Publisher: Wiley-IEEE, PP.194.
- 5 - Gillespie, Thomas, (1992). *Funamental of vehicle dynamic*. Publisher: SAE, PP.38.
- 6 - Kazemi, R. (2000). "A New sliding controller for four-wheel anti-lock braking system." *SAE World Congress 2000*, Paper Series:2000-01-1639.
- 7 - Luca Piancastelli and Andrea Cacciari (2001). "Fuel consumption optimization and power requirment reduction via multiple speed gearbox and automatic selection for an automotive application." *XII ADM International Conference*, Rimini-Italy.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Acceleration Performance
- 2 - In Gear Acceleration
- 3 - Overtake Acceleration
- 4 - Through Gear Acceleration
- 5 - Box
- 6 - Complex method