The Journal of Engine Research

Spring 2025, Vol. 72, No. 1, pp. 45-58

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Original Research

Performance and fuel consumption simulation for optimized manual transmission gear ratio selection

Alireza Batooei*

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:
Performance Simulation
Fuel Consumption
Optimum Gear Ratio Selection
Engine and Transmission Integration
Vehicle Target

ABSTRACT

The performance and fuel consumption are simulated for the vehicle equipped with manual transmission by GT in this research. The choice of gear ratio for legal compatibility and fuel consumption and performance targets is performed when the engine is finalized for powertrain system in the initial state of project. The important targets design selected as gradeability in 8–12–20–24 -30 (%), maximum speed (km/h), 0-100 km/h, in gear acceleration (s) in each gear and fuel consumption in this research. The four suggested gear ratios which available and produced by supplier are chosen and simulated, and the optimum gear ratios are selected by comparison with vehicle targets and design maturity. The experimentally results are used for the validation and the comparison between experimental and simulation results is done . Fuel consumption (l/100km) and 0-100 (Zero to on handreed kilometer-(s)) acceleration are simulated by 3.3% and 7.4 % error, respectively.

© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* Corresponding author
E-mail address: Batooei@iust.ac.ir (A. Batooei)

Received 18 May 2025; Accepted 4 June 2025
E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Batooei A. Performance and fuel consumption simulation for optimized manual transmission gear ratio selection. The Journal of Engine Research. 2025 May 22;72(1):45-58. doi: 10.22034/ER.2025.2058229.1091

نشریه علمی تحقیقات موتور
بهار ۱۴۰۴، جلد ۷۲، شماره ۱، صفحه ۴۵-۵۸
تارنمای نشریه: www.engineresearch.ir

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت برای انتخاب بهینه نسبت دنده خودرو مجهز به جعبه‌دندهٔ‌دستی

علیرضا بتوئی *

دانشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:
شبیه‌سازی عملکرد
مصرف سوخت
انتخاب نسبت دنده بهینه
یکپارچه‌سازی موتور و جعبه‌دنده
هدف خودرویی

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت یک خودرو مجهز به جعبه‌دندهٔ‌دستی در نرم‌افزار جی تی انجام شده است. در مراحل ابتدایی یکپارچه‌سازی قوای محرکه خودرو پس از نهایی شدن موتور، باید انتخاب نسبت دنده‌های جعبه‌دنده با محدودیت پاسخگویی به هدف‌های مصرف سوخت و عملکرد خودرو انجام شود. در این تحقیق ویژگی‌های شیب پیمایی، صفرتاصد، بیشینهٔ سرعت، شتاب‌گیری در دنده‌های مختلف و مصرف سوخت به عنوان هدف‌های مهم طراحی مطرح شده است. در ادامه برای ۴ سری نسبت دنده موجود و پیشنهادی سازنده جعبه‌دنده شبیه‌سازی انجام شده است و در نهایت نسبت دنده بهینه با توجه به معیار پاسخگویی به هدف‌های خودرویی و منطق طراحی انتخاب شده است. نتایج تجربی خودرو سواری شامل مصرف سوخت و صفرتاصد با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. مصرف سوخت با دقت ۳,۳ درصد و صفرتا صد با دقت ۷,۴ درصد شبیه‌سازی شده است.

© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* نویسنده مسئول
پست الکترونیکی: Batooei@iust.ac.ir (علیرضا بتوئی)

دریافت ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۴ خرداد ۱۴۰۴
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Batooei A. Performance and fuel consumption simulation for optimized manual transmission gear ratio selection. The Journal of Engine Research. 2025 May 22;72(1):45-58.doi: 10.22034/ER.2025.2058229.1091

۱– مقدمه

جعبه‌دنده‌های‌دستی متداولترین نوع جعبه‌دنده بکار رفته در خودروها و در عین حال قابل اطمینان ترین آنها می‌باشند. ساختار داخلی این نوع جعبه‌دنده‌ها در طول زمان دستخوش تغییرات بسیاری شده است. مرسوم ترین ساختار داخلی که امروزه نیز بر روی اکثریت خودروهای دستی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ساختاری است که با نام دائماً درگیر[1] شناخته می‌شود. در این نوع از جعبه‌دنده‌ها همه دنده‌ها با هم درگیر هستند، این عمل باعث عملکرد آرام و بدون صدای این دنده‌ها شده و صدایی کم در زمان جا زدن دنده‌ها ایجاد می‌نماید. در این سامانه چون دنده‌ها همیشه با هم درگیر هستند می توان از دنده های مارپیچی[2] استفاده نمود. انتخاب این نوع چرخدنده نیز در کاهش صدا و عملکرد نرم تر جعبه‌دنده موثر است. در این نوع جعبه‌دنده هر دنده روی محور اصلی با دنده متناظر روی محور ثانویه درگیر است. بنابراین در این حالت بدون توجه به اینکه خودرو در چه دنده ای قرار دارد، در هر حال تمام دنده‌ها در حال چرخش هستند، اما تنها یکی از این دنده های در حال چرخش است که می تواند متناسب با شمارهٔ دنده مورد نیاز با محور اصلی وابسته شود و آنرا به حرکت درآورد.

در مراحل ابتدایی طراحی و توسعه کفی خودرویی، هدف‌های ۱۵ گانه خودرویی نظیر قیمت، ایمنی، عملکرد، نوفه، مدیریت حرارتی و ... توسط متخصصین بررسی و هدف گذاری می‌شوند. یک از هدف‌های مهم و اساسی، هدف عملکرد[3] و مصرف سوخت محصول است. این هدف شامل بیش از ۱۸۰ متغیر کمی و کیفی است. برخی از هدف‌ها مانند آلایندگی و مصرف سوخت محدودیت قانونی دارند و برخی دیگر نظیر آغاز حال سرد، شتاب‌گیری در دنده‌های مختلف[4] و ... متغیری کیفی برای رقابت در بازار می‌باشند.

در روش پالس که روشی مرسوم برای خودروسازان است، چند هدف را به عنوان هدف کلیدی در ابتدای طرح انتخاب می‌کنند. باید در چند هدف، هدف در محدوده پیشروها بودن[5] و در یک یا چند متغیر کلیدی پیشرو بودن[6] هدف گذاری شود. در این روش انتخاب خودروهای رقیب داخلی، خارجی و استخراج متغیرهای کلیدی آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

استفاده از الگوریتم فازی به منظور کاهش مصرف سوخت برای خودروی مجهز به جعبه‌دنده پیوسته توسط مشهدی و همکاران [۱] انجام شده است. تابع هدف در اینجا، منحنی نسبت دنده جعبه‌دنده با نسبت انتقال پیوسته[7] و مصرف سوخت بهینه در صفحه دور گشتاور موتور احتراق داخلی است و با تنظیم نسبت دنده سعی شده است که با تغییر شرایط کار خودرو، موتور همواره نزدیک به این منحنی حرکت کند. در این تحقیق کاهش ۱٫۶ درصد مصرف سوخت در چرخه استاندارد اروپا گزارش شده است.

صبوحی و فرزانه [۲] الگویی برای بهینه نمودن بازده انرژی با کنترل سرعت و انتخاب نسبت دنده ارائه دادند. در محاسبات خود علاوه بر چرخه استاندارد اروپا[8]، چرخهٔ رانندگی واقعی را نیز در نظر گرفتند. پس از انجام محاسبات و انتخاب نقاط بهینه، خودرو را آزمون نموده و کاهش ۳۷ درصدی مصرف سوخت را ثبت نمودند.

یولانوف[9] و ترایانوسکالا[10] [۳] بهینه‌سازی نسبت دنده در جعبه‌دنده را انجام دادند. مصرف سوخت و رفتار بهینه دینامیکی خودرو را تابع هدف برای بهینه شدن انتخاب نمودند. یک الگوی ریاضی برای انتخاب نسبت دنده متناسب با

---

1 Constant Mesh
2 Helical
3 Performance Target
4 In Gear Acceleration
5 Among the Leader
6 Leader
7 Continuously Variable Transmission (CVT)
8 NEDC
9 Ulanov
10 Troyanovskaya

حالت حرکتی خودرو توسعه دادند. وابستگی سرعت موتور و نسبت دنده خودرو ایجاد نقاط بهینه عملکردی را فراهم داشته است. در نهایت به این نتیجه رسیدند که با تغییر پیوسته نسبت دنده، امکان کنترل بهتر و بهینه نمودن بازده جعبه‌دنده اتفاق می‌افتد.

اکرت[1] و همکاران [۴] بهینه‌سازی چند منظوره برای طراحی سامانه انتقال قدرت را انجام دادند. بهبود مصرف سوخت، عملکرد شتاب‌گیری و آلایندگی در این تحقیق مد نظر بوده است.متغیرهای بهینه سازی، تعداد دنده، نسبت دنده ها، نسبت دیفرانسیل و ابعاد چرخ می‌باشند. از روش وراثت برای بهینه سازی استفاده نمودند و ۱۴,۵ درصد کاهش مصرف سوخت و ۲,۴۵ درصد کاهش هیدروکربن نسوخته و ۲۳,۸ درصد کاهش اکسیدهای ازت را گزارش دادند.

کانت[2] [۵] تحلیل تأثیر انواع جعبه‌دنده بر روی خط اصطکاکی را بوسیله نرم افزر جی تی انجام داد. سه نوع جعبه‌دندهٔدستی، نسبت انتقال پیوسته و خودکار در این تحقیق بررسی شدند. بررسی در چرخه جهانی روش آزمون برای خودروهای سبک[3] انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در قسمت‌هایی از چرخه که سرعت خودرو کُند است بار اعمال شده نقش اساسی در اصطکاک را دارد و در سرعت‌های بالا و متوسط خودرو روغن‌کاری و درزبندی نقش مهمی در اصطکاک را دارند.

سید مسعود هاشمی و همکاران [۶] بهینه سازی نسبت‌های تبدیل جعبه دنده خودرو با هدف ایجاد بیشترین نیروی کشش ممکن را انجام دادند. ابتدا نسبت دنده‌ها با روش متداول انتخاب شده است. در ادامه ترند نزدیک شدن نیروی کششی در دنده‌های متفاوت به نمودار نیروی کششی آرمانی انجام شده است. در انتها برای صحه‌گذاری نتایج را با نتایج آزمون خودرو واقعی مقایسه نمودند. نتایج تحقیق بهینه‌سازی جعبه‌دنده، میزان بهبود نیروی کششی در بیشترین حالت ۱۷,۵ درصد، شیب‌روی ۱۶,۳ درصد، شتابگیری ۱۷,۲ درصد و گشتاور ۱۳,۵ درصد در دنده سه را نشان می‌دهد.

کرمیان منش و همکاران [۷] بررسی و مقایسه گزینه‌هایی برای انتخاب قوای محرکه مناسب برای یک خودرو انجام دادند. دو موتور و یک جعبه دنده دستی با قابلیت تغییر نسبت دنده‌ها را بررسی نمودند. بهینه سازی توسط دو روش وراثت و طراحی آزمایش‌ها[4] در چرخهٔ استاندارد اروپایی انجام شده است. ۱۳,۵ درصد کاهش مصرف سوخت را گزارش نمودند.

اکبرپوران خیاطی و همکاران [۸] کاهش آلایندگی و مصرف سوخت موتور دیزلی او ام ۳۵۵[5] با استفاده از سامانه سوخت رسانی لوله مشترک و مهار آلایندگی را بررسی نمودند. در این تحقیق با بکارگیری سامانه سوخت رسانی لوله مشترک و تأمین سوخت با فشار قوی در پشت افشانه‌ها و بهبود احتراق، هدف حفظ عملکرد موتور و کاهش مقدار آلایندگی و مصرف سوخت است. تنها اکسیدهای ازت[6] در این تحقیق افزایش را نشان داده است.

رحمتی نژاد و همکاران [۹] تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش افشانه‌ها را به صورت تجربی بررسی نمودند. یک دستگاه آزمون تجربی برای بررسی دقیق در این تحقیق ساخته شده است. آزمایش‌ها در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام شده است. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که باتغییر فشار سوخت از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع در مدت ۳۰ ثانیه مقدار پاشش ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد هر چقدر ولتاژ سامانه زیاد باشد مقدار پاشش نیز بیشتر خواهد شد که بر مقدار مصرف سوخت نیز اثر می‌گذارد.

در این تحقیق شبیه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت خودروی شاهین مجهز به موتور ۱,۵ لیتری پرخوران متصل به جعبه‌دندهٔدستی ۵ سرعتی انجام شده است. برای جعبه‌دنده شاهین ۴ نسبت دنده پیشنهادی توسط سازنده جعبه‌دنده

[1] Eckert
[2] Kunt
[3] Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)
[4] DOE
[5] OM355
[6] NOx

پیشنهاد شد که عملکرد خودرو برای چهار سری پیشنهادی شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. برای انتخاب نسبت دنده بهینه پاسخگویی به هدف‌های خودرویی و رعایت اصول طراحی جعبه‌دنده در زمینه گام نسبت دنده‌ها معیار انتخاب قرار گرفته است. چرخهٔ رانندگی برای محاسبات مصرف سوخت، چرخه استاندارد اروپا است.

۲- مواد و روش ها

شبیه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت خودرو در این تحقیق در نرم‌افزار جی تی انجام شده است. نرم‌افزار جی تی یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه‌سازی خودرو در زمینه شبیه‌سازی عملکرد، مصرف سوخت، مجموعه خنک کاری، روغن کاری، سامانهٔ گرمایش و تهویه مطبوع، خودروهای برقی و هیبریدی و ... است. در این تحقیق از ماژول جی تی درایو[1] برای شبیه‌سازی مصرف سوخت و عملکرد خودرو استفاده شده است. به هر مقدار اطلاعات ورودی برای شبیه‌سازی نمودن خودرو کامل تر باشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز دقیق‌تر خواهد بود.

این نرم‌افزار از قابلیت‌های ذیل برخوردار است [۷]:

اندازه‌گیری و تطابق موتور–جعبه‌دنده– خودرو

تحلیل مقدار انتشار آلاینده‌ها و مقدار مصرف سوخت در چرخهٔ رانندگی

پیش‌بینی عملکرد خودرو

ارزیابی اجزای سامانه نیروی محرکه

کنترل موتور و سامانه انتقال قدرت

سه سطح از شبیه‌سازی موتور

چنانچه این نرم‌افزار در مود دینامیکی پیشرو[2] اجرا گردد، در این حالت واکنش خودرو به ورودی‌های از طرف راننده، مبنای محاسبه قرار می‌گیرد. اگر نرم‌افزار در مود سینماتیکی پس‌رو[3] اجرا شود، وضعیت موتور و ورودی‌های از سمت راننده، بر طبق یک وضعیت مشخص خودرو محاسبه می‌شوند. مورد سوم، مود استاتیکی می‌باشد که برای تحلیل ترکیب خودرو–جعبه‌دنده–موتور بکار می‌رود. در این شبیه‌سازی حال پیشرو انتخاب شده است.

اساسی ترین اجزا برای شبیه‌سازی مسیر حرکتی خودرو به شرح ذیل است:

خودرو: جرم، مساحت پیشانی خودرو، ضرایب لیفت و درگ، مرکز جرم و فاصله محور جلو و عقب

جعبه‌دنده مجزا همراه راهبرد تعویض دنده .

اجزای لغزشی مانند چنگک، مبدل گشتاور، چرخ و ترمز.

شبیه‌سازی موتور با توجه به شرایط هندسی، منحنی عملکردی موتور برای توان، گشتاور و مصرف سوخت در بارهای متفاوت انجام شده است.

اطلاعات جاده و شرایط محیطی خودرو نیز باید به نرم‌افزار به عنوان ورودی داده شود. شیب و انحنا جاده و شرایط محیطی نظیر دما، فشار، سرعت، وزش باد و رطوبت در این حوزه قابل اعمال است.

خروجی ها در نرم‌افزار جی تی شامل موارد ذیل است:

– نمودارهای نیروی کشش[4]، توان، شتاب و مصرف سوخت برحسب سرعت خودرو در تحلیل استاتیکی

– سرعت‌های لحظه ای خودرو/سامانه انتقال قدرت، نیروها و گشتاورهای لحظه ای

– نسبت ها و بازده‌های لحظه ای، وضعیت‌های کلاچ، مبدل گشتاور، موتور و اجزای برقی

– مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها: لحظه‌ای، مصرف کل، مقادیر متوسط، متوسط‌های ترمزی ویژه و مسافتی ویژه

[1] GT Drive
[2] Forward
[3] Backward
[4] Tractive Force

برای افزایش دقت شبیه‌سازی باید اطلاعات ورودی به طور کامل به نرم‌افزار وارد شود. در این تحقیق از اطلاعات خودروی شاهین برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی خودرویی به صورت ذیل طبقه بندی شده است.

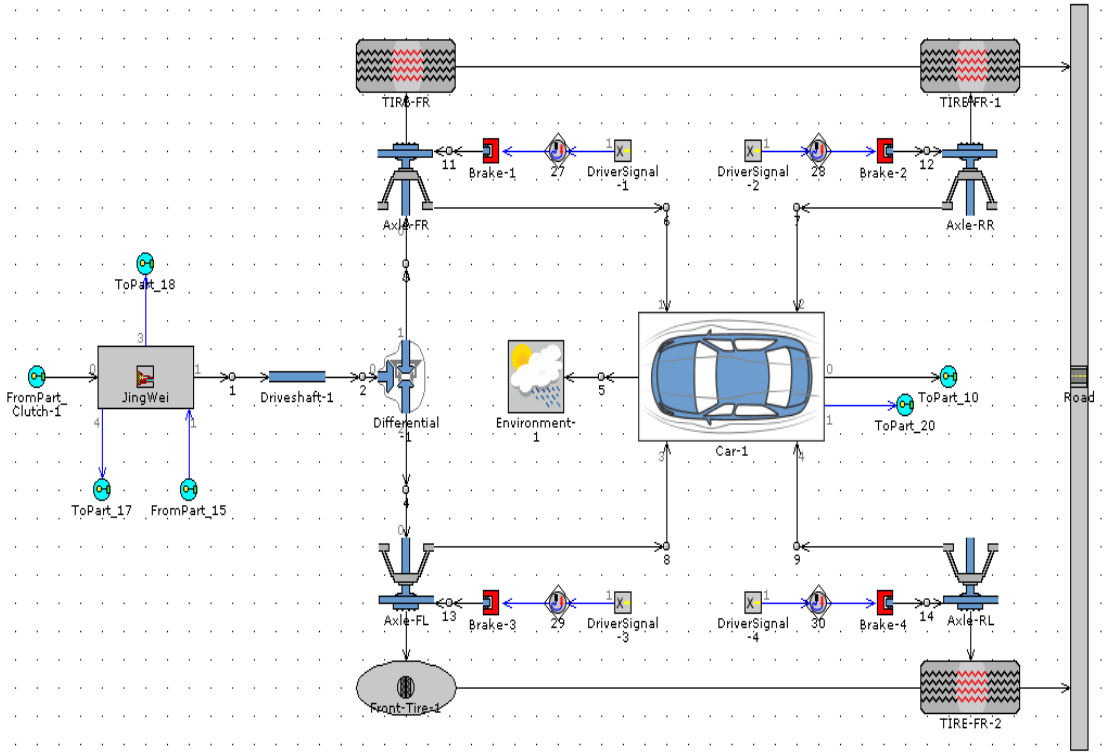
جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت

ردیف	ویژگی	ردیف	ویژگی
۱	ویژگی‌های خودرویی	۷	ویژگی موتور
۲	ویژگی جعبه‌دنده	۸	منحنی گشتاور در حالت تمام بار
۳	نسبت دنده‌های جعبه‌دنده	۹	ویژگی‌های لاستیک
۴	منحنی بازده جعبه‌دنده	۱۰	منحنی اصطکاکی لاستیک
۵	راهبرد شیفتینگ بر حسب دور موتور	۱۱	ویژگی‌های کلاچ
۶	راهبرد شیفتینگ بر حسب سرعت خودرو		

ویژگی‌های مورد نیاز شبیه‌سازی خودروی شاهین بر مبنای جدول ۱ برای مشخصات فنی موتور، نسبت دنده‌های موجود جعبه‌دنده، وزن خودرو، ضریب آئرودینامیک، مشخصات فنی لاستیک و سایر متغیرهای مورد نیاز در نرم‌افزار جی تی اعمال شده است. نمایی از طرح تهیه شده در این نرم‌افزار در شکل ۱ نشان داده شده است.

برخی از مشخصات مهم اعمال شده برای شبیه‌سازی در جدول ۲ ذکر شده است.

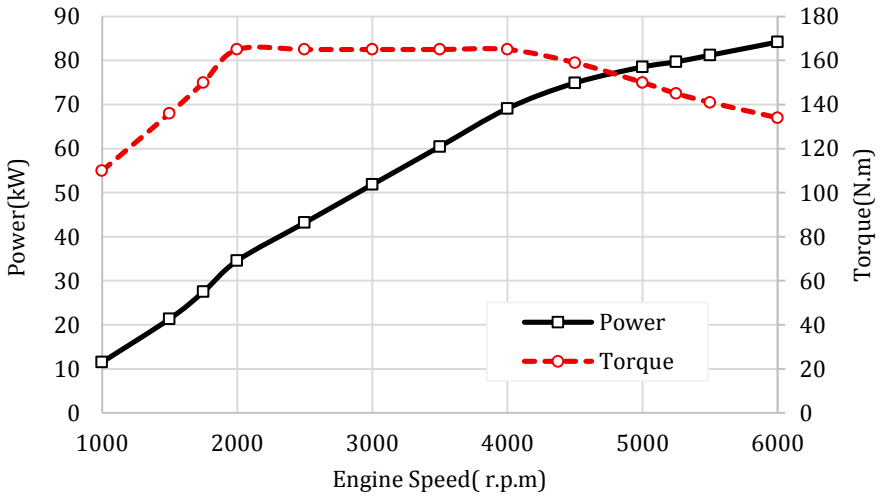
خودروی شاهین مجهز به موتور ۱٫۵ لیتر پرخوران با بیشینه توان ۸۴ کیلووات در۵۲۵۰ دوربردقیقه و بیشینه گشتاور ۱۶۵نیوتن متر در ۲۰۰۰–۴۰۰۰ دوربر دقیقه است. در شکل ۲ منحنی توان و گشتاور موتور رسم شده است.



شکل ۱ نمایی از طرح تهیه شده در نرم‌افزار جی تی

جدول ۲ مشخصات خودرو برای شبیه‌سازی

نوع ویژگی	مقدار ویژگی (واحد)
وزن خالی خودرو[1]	۱۲۵۰ کیلوگرم
وزن سرنشین مجاز	۳۷۵ کیلوگرم
فاصله مرکز ثقل تا محور عقب	۱۵۰ سانتیمتر
سطح آیرودینامیکی	۲,۳۱ متر مربع
اندازهٔ چرخ	R15 ۱۸۵٫۶۵
بیشینه توان موتور	۸۴ کیلووات
بیشینه گشتاور موتور	۱۶۵ نیوتن متر
ضریب آیرودینامیکی	۰,۳۲



شکل ۲ منحنی توان خروجی موتور شاهین

جعبه‌دندهٔ ۵ سرعته دستی خودرو وزن ۴۳٫۵ کیلوگرم دارد و منحنی بازده بر حسب دور برای دنده‌های متفاوت توسط سازنده ارائه شده است. نسبت دنده‌های پیشنهادی سازنده جعبه‌دنده در جدول ۳ ذکر شده است. هدف انتخاب نسبت دنده بهینه برای پاسخگویی به هدف‌های خودرویی است.

جدول ۳ نسبت دنده‌های پیشنهادی

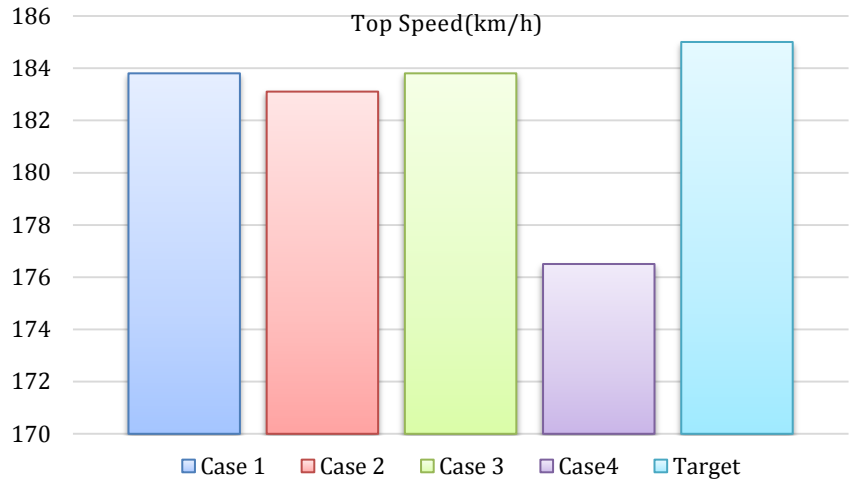
نسبت دنده‌ها	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
دندهٔ ۱	۳,۵۸۳	۳,۵۸۳	۳,۵۸۳	۳,۵۸۳
دندهٔ ۲	۱,۹۴۷	۱,۹۴۷	۲,۱۱۱	۱,۹۴۷
دندهٔ ۳	۱,۳۷۹	۱,۳۷۹	۱,۳۷۹	۱,۳۷۹
دندهٔ ۴	۱,۰۳	۱,۰۳	۱,۰۳	۱,۰۳
دندهٔ ۵	۰,۷۶۷	۰,۷۶۷	۰,۷۶۷	۰,۸۰۴
رانندهٔ نهایی	۴,۰۵۳	۴,۳۳۳	۴,۰۵۳	۴,۳۳۳

لازم به ذکر است هدف‌های خودرویی بر اساس نظریه پالس توسط تیم متخصص مهندسی خودرو انتخاب می‌شود.

[1] Kerb Weight

۳– نتایج و بحث

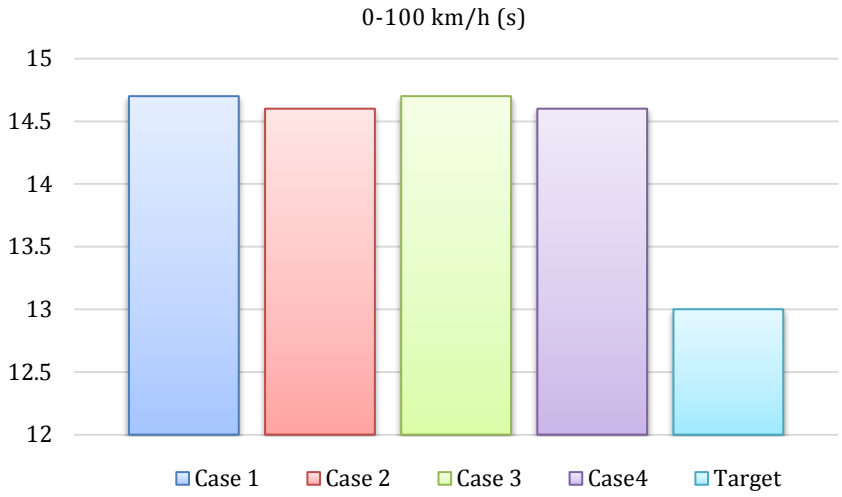
هدف بیشینه سرعت خودرویی ۱۸۵ کیلومتر بر ساعت است. باید خودرو در حالت وزن ناخالص وسیلهٔ نقلیه[1] شبیه‌سازی شود. در شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی بیشین سرعت و مقایسه با هدف نشان داده شده است.



شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی بیشینه سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت

حالت‌های ۱، ۲و ۳ به هدف نزدیک است ولی حالت ۴ بدلیل رسیدن به قطع نمودن[2] موتور از هدف فاصله گرفته است. در حالت ۱و ۳ بیشینه سرعت ۱۸۳٫۸ کیلومتر بر ساعت است و در حالت ۴ بیشینه سرعت ۱۷۶٫۵ کیلومتر بر ساعت پیش‌بینی شده است.

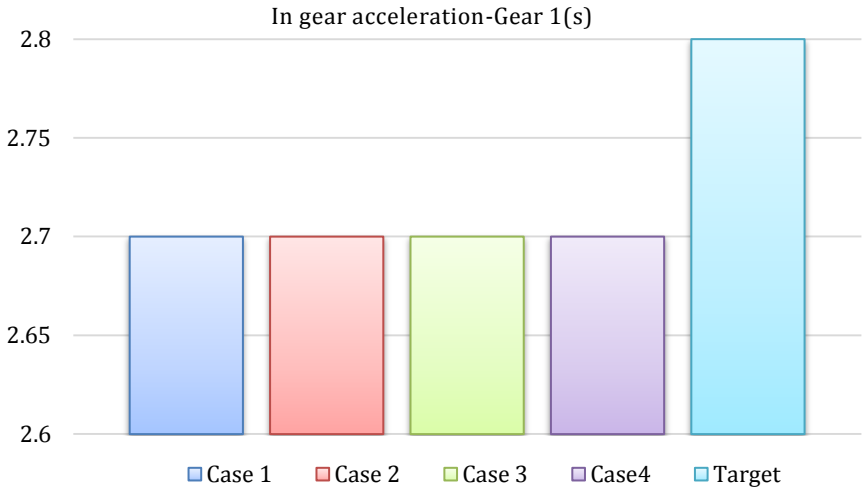
هدف شتاب صفر تا صد خودرو ۱۳ ثانیه است. باید خودرو در حالت تمام بار شبیه‌سازی شود. همانطور که شکل ۴ نشان داده شده است، شتاب صفرتاصد در تمامی حالت‌ها بدتر از هدف بدست آمده است. مقدار شتاب در شبیه‌سازی حالت‌های ۲ و۴ بهتر از حالت‌های ۱ و ۳ است. در حالت ۲ و ۴ مقدار شتاب ۱۴٫۶ ثانیه محاسبه شده است. قابل ذکر است باید تغییر دنده در بیشترین سرعت موتور در هر دنده انجام شود.



شکل ٤ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب صفرتاصد بر حسب ثانیه

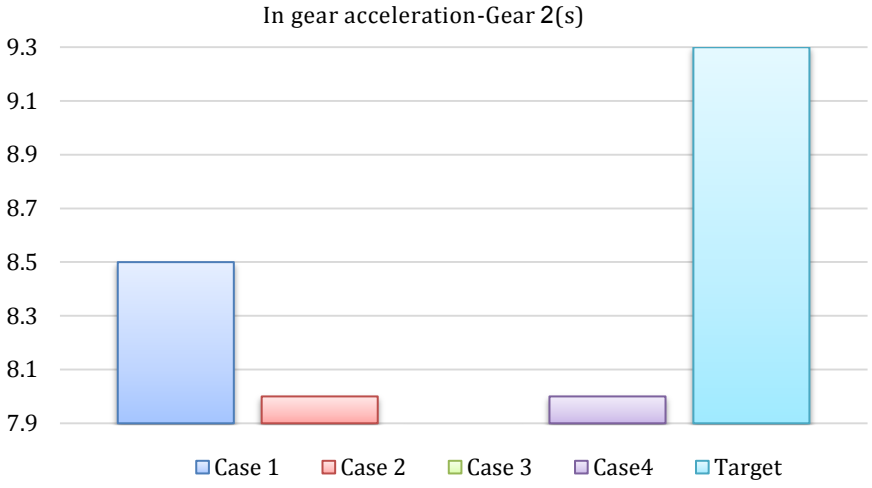
[1] Gross Vehicle Weight (GVW)
[2] Cut off

در شکل ۵ نتایج شتاب‌گیری در دنده[1] نشان داده شده است. هدف خودرویی ۲٫۸ ثانیه است. تمامی حالت‌ها شرایط نسبتاً یکسانی دارند و به هدف رسیدند.



شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۱ از سرعت ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت

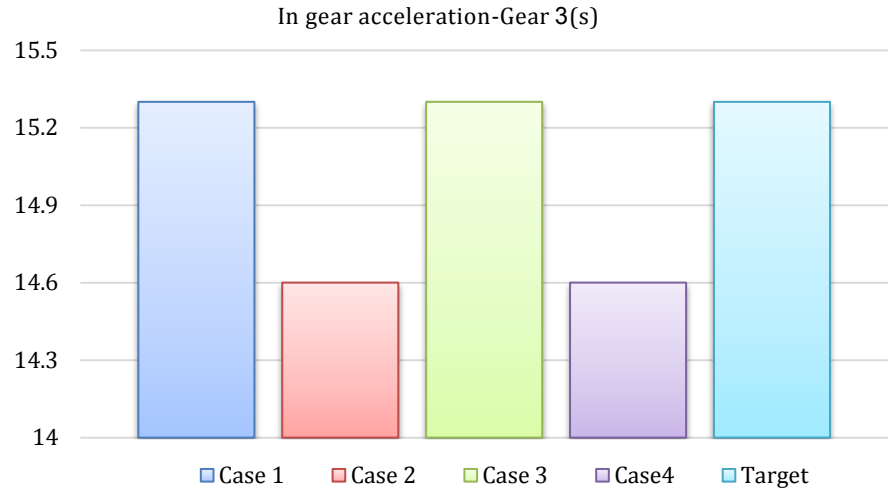
هدف شتاب‌گیری در دندهٔ ۲ برای رسیدن از سرعت ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت، ۹٫۳ ثانیه است. همانطور که در شکل ۶ زمان رسیدن از سرعت ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت نشان داده شده است، تمامی حالت‌ها پاسخگوی هدف خودرویی می‌باشند. حالت‌های ۲، ۳ و۴ شرایط نسبتا یکسانی دارند و حالت ۱ مقدار زمان لازم را ۸٫۵ ثانیه پیش‌بینی نموده است.



شکل ٦ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۲ از سرعت ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۳ برای رسیدن از سرعت ۳۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه نشان داده شده است. هدف این شتابگیری ۱۵٫۳ ثانیه است و در حالت‌های ۲ و ۴ بهترین نتایج با ۱۴٫۶ ثانیه بدست آمده است. در حالت‌های ۱ و ۳ نیز هدف به صورت مرزی برآورده شده است.

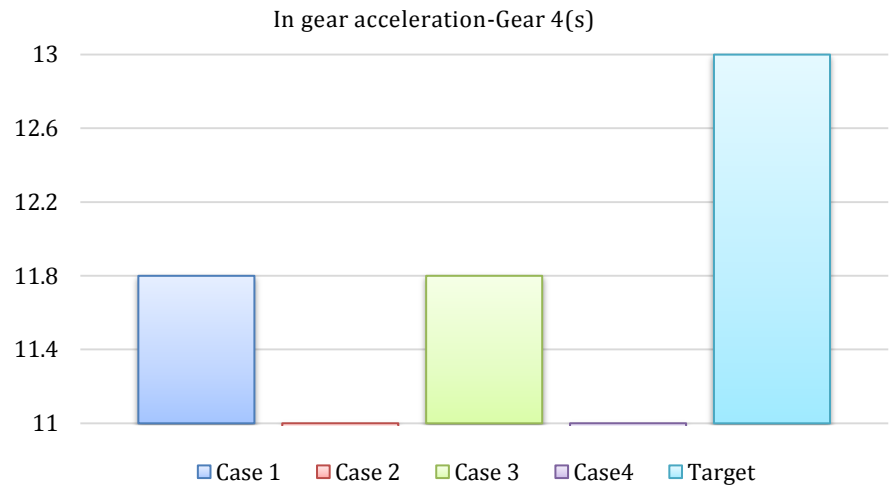
[1] In Gear Acceleration



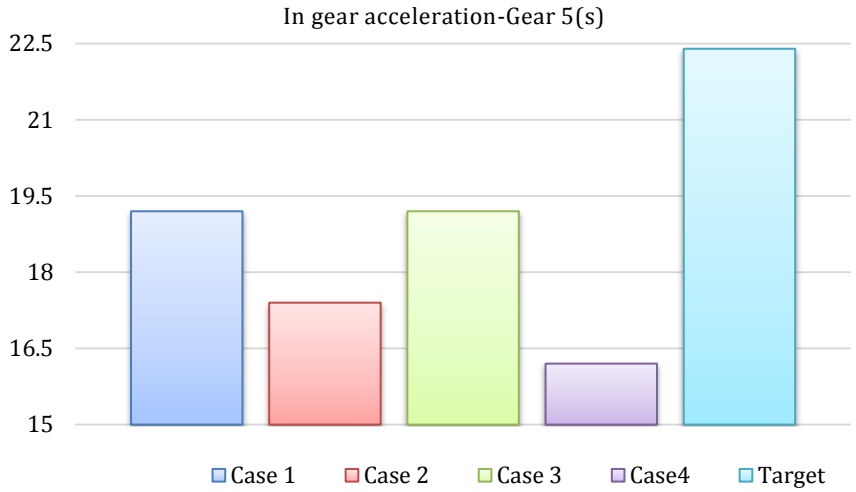
شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۳ از سرعت ۳۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه

هدف شتاب‌گیری در دندهٔ ۴ برای رسیدن از سرعت ۶۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در شکل ۸ نشان داده شده است. تمامی حالت‌ها پاسخگوی هدف خودرویی می‌باشند. حالت‌های ۲و ۴ شرایط نسبتا یکسانی دارند و بهترین حالت را دارند. شبیه‌سازی مقدار زمان لازم را ۱۰,۹ ثانیه پیش‌بینی نموده است. هدف ۱۳ ثانیه است. در شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی زمان لازم برای شتاب‌گیری در دندهٔ ۵ برای رسیدن از سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه نشان داده شده است. هدف خودرویی ۲۲,۴ ثانیه است و بهترین نتایج در حالت ۴ با ۱۶,۲ ثانیه و حالت ۲ با ۱۷,۴ ثانیه پیش‌بینی شده است. تمامی حالت‌ها نیز پاسخگوی هدف می‌باشند.

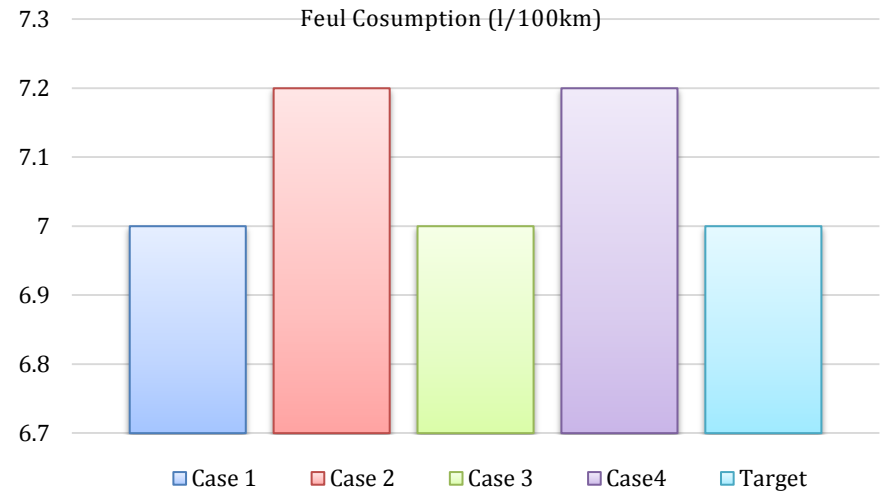
در شکل ۱۰ مصرف سوخت که یکی از مهمترین متغیرهای عملکردی است و دارای استانداردهای کشوری است نشان داده شده است. هدف مصرف سوخت خودروی مورد بررسی ۷ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر انتخاب شده است. حالت‌های ۱و ۳ به صورت مرزی پاسخگوی هدف مصرف سوخت می‌باشند. حالت‌های ۲و ۴ نتوانستند استاندارد مصرف سوخت را رعایت کنند. با توجه به جریمه سنگین سازمان استاندارد برای مصرف سوخت خودروها، اهمیت این متغیر بسیار بالا است و در حال حاضر چنانچه میانگین مصرف سوخت یک خودرو ساز بالاتر از حد استاندارد باشد، جریمه سنگین باید پرداخت نماید.



شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۴ از سرعت ۶۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه



شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی شتاب‌گیری در دندهٔ ۵ از سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بر حسب ثانیه



شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی و هدف خودرویی مصرف سوخت ترکیبی بر حسب لیتر در ۱۰۰ کیلومتر

برای صحه‌گذاری و بررسی دقت طرح تهیه شده از دو متغیر شتاب۱۰۰-۰ کیلومتر بر ساعت و مصرف سوخت ترکیبی استفاده شده است. خودروی شاهین مجهز به جعبه‌دندهٔدستی با نسبت دنده پیشنهادی حالت ۱ بر روی خودرو نصب و نتایج آزمون مصرف سوخت و شتاب ۱۰۰-۰ کیلومتر بر ساعت توسط مرکز تحقیقات و نوآوری شرکت سایپا گزارش شده است. در جدول۴ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی ذکر شده است.

جدول ٤ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی

ویژگی	شبیه‌سازی	تجربی	خطا (٪)
شتاب ۱۰۰-۰ (ثانیه)	۱۴٫۶	۱۳٫۶	۷٫۴
مصرف سوخت (لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر)	۷	۷٫۲۴	۳٫۳

با توجه به نسبت دنده‌های موجود و پیشنهادی شرکت سازنده جعبه‌دنده، مشخص شد حالت‌های ۲ و ۴ هدف مصرف سوخت خودرو را جوابگو نیستند. لذا به نظر می‌رسد نسبت دندهٔ بهینه باید از بین نسبت دنده‌های پیشنهادی در حالت ۱ یا

۳ انتخاب شود. در جدول ۵ ویژگی‌های شبیه‌سازی شده، مقدار هدف برای نسبت دنده‌های حالت ۱ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۵ ویژگی‌های شبیه‌سازی شده، مقدار هدف برای نسبت دنده‌های حالت ۱ و ۳

ویژگی	حالت ۱	حالت ۳	هدف
بیشینه سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۱۸۳٫۸	۱۸۳٫۸	۱۸۵
صفر تا صد بر حسب (ثانیه)	۱۴٫۷	۱۴٫۷	۱۳
سرعت ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت –دندهٔ ۱	۲٫۷	۲٫۷	۲٫۸
سرعت ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت –دندهٔ ۲	۸٫۵	۷٫۹	۹٫۳
سرعت ۳۰ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت –دندهٔ ۳	۱۵٫۳	۱۵٫۳	۱۵٫۳
سرعت ۶۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت –دندهٔ ۴	۱۱٫۸	۱۱٫۸	۱۳
سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت –دندهٔ ۵	۱۹٫۲	۱۹٫۲	۲۲٫۴
مصرف سوخت (لیتر بر صد کیلومتر)	۷	۷	۷

همانطور که از جدول ۵ قابل مشاهده است، دو نسبت دنده پیشنهادی تمامی هدف‌ها بجز صفرتاصد را پاسخگو هستند. از طرفی در شتابگیری دندهٔ ۲ نسبت دنده پیشنهادی حالت ۳ کمی برتری نسبت به حالت ۱ دارد. در اینجا باید گام دنده‌ها نیز بررسی شود تا مشخص شود زمان بهتر شتابگیری دندهٔ ۲ بدلیل کوتاه بودن زمان به خاطر گام نامناسب است و یا سازگاری موتور با این نسبت دنده بهتر است.

در جدول ۶ گام دنده‌های ۲–۱، ۳–۲، ۴–۳ و ۵–۴ برای چهار حال پیشنهادی و مقدار این نسبت گام برای خودروهای الگوبرداری ۲۰۶، سمند، تند ۹۰ و تیبا ذکر شده است.

جدول ٦ ویژگی‌های شبیه‌سازی شده، مقدار هدف برای نسبت دنده‌های حالت ۱ و ۳

	گام۲–۱	گام۳–۲	گام۴–۳	گام۵–۴
حالت ۱	۱٫۸۴۰۲۶۷	۱٫۴۱۱۸۹۳	۱٫۳۳۸۸۳۵	۱٫۳۴۲۸۹۴
حالت ۲	۱٫۸۴۰۲۲۶۷	۱٫۴۱۱۸۹۳	۱٫۳۳۸۸۳۵	۱٫۳۴۲۸۹۴
حالت ۳	۱٫۶۹۷۳	۱٫۵۳۰۸۱۹	۱٫۳۳۸۸۳۵	۱٫۳۴۲۸۹۴
حالت ۴	۱٫۸۴۰۲۶۷	۱٫۴۱۱۸۹۳	۱٫۳۳۸۸۳۵	۱٫۲۸۱۰۹۵
۲۰۶	۱٫۷۵۱۷۹۵	۱٫۴۱۸۱۸۲	۱٫۳۰۴۵۵۴	۱٫۲۳۵۶۳۹
سمند	۱٫۸۶۷۵۶۸	۱٫۴۴۵۳۱۳	۱٫۳۲۰۹۴۹	۱٫۲۸۰۰۵۳
تندر۹۰	۱٫۸۱۹۸۲۴	۱٫۴۷۳۳۸۱	۱٫۳۴۹۵۱۵	۱٫۲۹۵۵۹۷
تیبا	۱٫۷۷۶۷۴۹	۱٫۴۹۵۳۸۵	۱٫۳۳۷۴۴۹	۱٫۲۳۹۷۹۶

همانطور که از جدول ۶ مشاهده می‌گردد، نسبت دنده‌های حالت ۳ برای گام ۲–۱ و ۳–۲ نامناسب است. به عبارتی در دندهٔ ۲ حالت ۳، به سرعت دور موتور جاروب شده و این حس ناخوشایند بری راننده به وجود می‌آید که باید خیلی زود از دندهٔ ۲ به دندهٔ ۳ برود. لذا باید نسبت دندهٔ ۲ سبک تر باشد که این موضوع در نسبت دنده پیشنهادی حالت ۱ برطرف شده است. لذا نسبت دنده‌های جعبه‌دنده متناسب با موتور ۱٫۵ لیتری توربو نسبت دنده پیشنهادی و موجود سازنده جعبه‌دنده در حالت ۱ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی مصرف سوخت و عملکرد خودرو برای انتخاب نسبت دنده مناسب خودروی شاهین بین ۴ حالت نسبت دنده پیشنهادی و موجود شرکت تأمین کننده جعبه‌دنده انجام شده است. متغیرهای منتخب برای بررسی در شبیه‌سازی و مقایسه با هدف بدین شرح است:

- شتاب صفرتاصد
- بیشینه سرعت خودرو
- شتابگیری از سرعت ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت در دندهٔ ۱
- شتابگیری از سرعت ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت در دندهٔ ۲
- شتابگیری از سرعت ۳۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت در دندهٔ ۳
- شتابگیری از سرعت ۶۰ تا کیلومتر بر ساعت ۱۰۰ در دندهٔ ۴
- شتابگیری از سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در دندهٔ ۵
- مصرف سوخت در چرخه استاندارد

برخی از هدف‌ها نظیر مصرف سوخت الزام قانونی داشته و باعث حذف دو نسبت دنده پیشنهادی شدند.

بررسی گام نسبت دنده‌ها نیز به عنوان متغیری که بر حس رانندگی تأثیر دارد و الگوبرداری انجام شده، محقق شد و نهایتاً نسبت دنده و رانندهٔ نهایی حالت ۱ به عنوان نسبت دنده بهینه برای خودروی شاهین انتخاب شد.

نتایج تجربی خودروی شاهین با نسبت دنده بهینه برای صحه‌گذاری شبیه‌سازی استفاده شد. دقت شبیه‌سازی مصرف سوخت ۳,۳ درصد و شتاب ۱۰۰-۰ کیلومتر بر ساعت ۷,۴ درصد است.

تشکر و قدردانی

از مرکز تحقیقات و نوآوری سایپا برای همکاری در ارائه نتایج برای صحه گذاری شبیه‌سازی تشکر می‌گردد.

References

[1] Mashhadi B, Abdalani A. Phazy algoritm design of changing gear ratio for fuel consumption in the CVT vehicle. In: Proceedings of the 2nd Combustion Conference; 2007 Feb; Tehran, Iran. [In Persian]

[2] Saboohi Y, Farzaneh H. Model for optimizing energy efficiency through controlling speed and gear ratio. Energy Efficiency. 2008 Feb;1:65-76.

[3] Ulanov AG, Troyanovskaya IP. Optimization of gear ratio of variable mechanical gearboxes. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 May 1 (Vol. 537, No. 3, p. 032007). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032007

[4] Eckert JJ, Santiciolli FM, Silva LC, Dedini FG. Vehicle drivetrain design multi-objective optimization. Mechanism and Machine Theory. 2021 Feb 1;156:104123.

[5] Kunt MA. Analysis of The Effect of Different Gearbox/Transmission Types on Driveline Friction Losses by Means of Gt Suite Simulation Programme. International Journal of Automotive Science and Technology. 2021 Jul 1;5(3):271-80. doi: 10.30939/ijastech..945675

[6] Hashemi SM, Tarahomi M, Houshyar M. Optimization of car gearbox conversion ratios based on providing maximum traction in different gears. The Journal of Engine Research. 2022 Mar 21;66(66):36-45. doi: 10.22034/er.2022.697911 [In Persian]

[7] Karamian Manesh MJ, Banagar I, Molaei Raoof Z, Moqtaderi H. Fuel consumption-aware powertrain selection and optimization for a B-class sedan. The Journal of Engine Research. 2022 Dec 22;69(69):12-20. doi: 10.22034/er.2022.697925 [In Persian]

[8] Akbarpouran Khayati E, Najjari B, Parsa S, Abedi MJ. Emissions and fuel consumption reduction of the OM355 diesel engine using a common rail fuel injection and selective catalytic reduction systems. The Journal of engine research. 2021 May 22;62(62):15-21. [In Persian]

[9] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpoor Shishevan F. Experimental analysis of the impact of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of automotive injectors. The Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering. 2024 Dec 21;3(2):69-79. doi: 10.22034/stme.2025.491200.1090 [In Persian]
[10] Theodoropoulos L, Chithaluri S. Implementation of vehicle model in GT-Suite for energy efficiency studies. 2022.