



تحلیل کاهش مصرف سوخت خودرو با فناوری نیم‌دونیرو ۴۸ ولت

زهرا صبح خیز میاندهی^۱، سید وحید حسینی^{۲*}، شهرام آزادی^۳، محمدرضا جمشیدی کارگر^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، Zahrasobhkhiz74@Email.kntu.ac.ir

^۲ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، V_hosseini@Shahroodut.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، Azadi@Kntu.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، Mrjamshidi@Aut.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۵ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

مصرف سوخت

موتور احتراق داخلی

خودروی نیم‌دونیرو

هیبرید

با توجه به بحران آلودگی هوا و افزایش گازهای گلخانه‌ای، استانداردهای آلاینده‌ها به مرور سختگیرانه‌تر می‌شوند و از طرفی کاهش مصرف سوخت‌های تجدیدناپذیر از اهداف اصلی صنایع خودروسازی در جهان به حساب می‌آید. یکی از پاسخ‌ها به این مسأله، استفاده از پیشران برقی در کنار پیشران احتراق داخلی است. در سال‌های اخیر خودروهای دونیرو برقی (HEV) با طراحی‌های متفاوت روانه بازار شده‌اند. در این بین با توجه به محدودیت‌ها و هزینه گران‌تری که این خودروها با آن مواجه‌اند، پیشران‌های نیم‌دونیرو (MHEV) از انتخاب‌های اصلی خودروسازان محسوب می‌گردند. دلیل این انتخاب، تأثیرگذاری مقبول نسبت به هزینه ارزان آن، به سبب تغییرات کم در قوای محرکه تک نیرو و قطعات، به همراه قابلیت اطمینان آن است. این پژوهش به بررسی کاهش مصرف سوخت به سبب پیاده‌سازی سامانه نیم‌دونیرو ۴۸ ولت در یک خودرو تک‌نیرو با پیشران احتراق داخلی می‌پردازد. به همین منظور، الگو کامل خودرو تک‌نیرو و نیم‌دونیرو با استفاده از بسته نرم‌افزاری GT-SUITE شبیه‌سازی شد و مصرف سوخت طی دو چرخه رانندگی NEDC و WLTC مورد مطالعه قرار گرفت. براساس نتایج، استفاده از سامانه نیم‌دونیرو باعث کاهش مصرف سوخت ۵٪ و ۹٪ به ترتیب در دو چرخه WLTC و NEDC شده است. با همکاری خودروسازان و کسب مشخصات کامل خودرو، می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد خودرو بدست آورد. همچنین می‌توان با بهینه‌سازی روش مه‌ار، بازده مصرف سوخت را افزایش داد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

با توجه به بحران آلودگی هوا و افزایش گازهای گلخانه‌ای، استانداردهای آلودگی به مرور سختگیرانه‌تر می‌شوند و از سوی دیگر کاهش مصرف سوخت‌های تجدیدناپذیر از اهداف اصلی صنایع خودروسازی در جهان به حساب می‌آیند.

یکی از پاسخ‌ها به این مسأله که در سال‌های اخیر پژوهشگران و مراکز تحقیقاتی وابسته به محیط زیست و خودروسازی به آن توجه ویژه‌ای نمودند، استفاده از پیشران برقی در کنار پیشران احتراق داخلی است. در سال‌های اخیر خودروهای دونیرو (HEV) با طراحی‌های متفاوت روانه بازار شده‌اند. مقالات متعدد در سال‌های اخیر حاکی از توجه پژوهشگران و صنایع به این موضوع است. خودروهای دونیرو برقی را براساس توان پیشران برقی می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم کرد:

۱- دونیرو میکرو (Micro)

۲- نیم‌دونیرو (Mild)

۳- دونیرو کامل (Full)

۴- دونیرو با قابلیت تغذیه^۲ (Plug-in)

در این بین با توجه به محدودیت‌ها و هزینه گرانی که این خودروها با آن مواجه‌اند، پیشران‌های نیم‌دونیرو (MHEV)^۳ از انتخاب‌های اصلی خودروسازان محسوب می‌گردد. دلیل این انتخاب قابلیت اطمینان و تأثیر گذاری مقبول نسبت به هزینه ارزان آن به سبب تغییرات کم در قوای محرکه تک نیرو و قطعات، است.

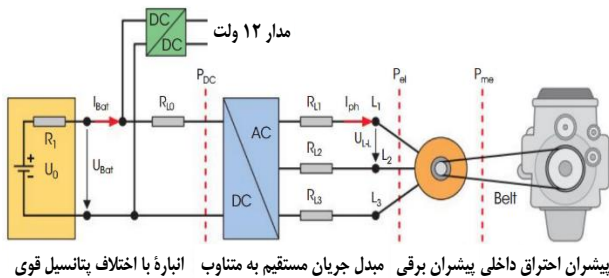
در یک خودرو دونیرو مرکز پردازش انرژی، توان و گشتاور درخواستی توسط راننده را بین پیشران احتراقی و برقی تقسیم می‌کند. از این رو محققان تلاش می‌کنند تا روش مهار توان بهینه در خودروهای نیم دونیرو را بیابند، که علاوه بر هزینه و زمان محاسبات کوتاه، ضریب اطمینان بزرگ، خودرو کمترین مصرف سوخت و متعاقباً کمترین آلودگی را داشته باشد.

خودرو با فناوری نیم‌دونیرو BISG (BAS^۴، BSG^۵، eAssist^۶) که نحوه اتصال اجزا آن در شکل ۱ نشان داده شده خودرویی است که پیشران برقی می‌تواند به عنوان موتور یا مولد جریان، جایگزین مولد جریان خودرو معمولی گردد.

این پیشران برقی به کمک تسمه به موتور احتراقی متصل می‌گردد و موازی با آن، توان مورد نیاز حرکت را تأمین می‌کند یا قسمتی از توان هدر رفته در ترمزگیری خودرو را که به صورت گرما تلف می‌گردد بازیابی می‌کند.

همچنین می‌تواند در مواردی که خودرو ساکن است آن را خاموش کند و با هرگونه اشاره راننده مبنی بر ادامه حرکت، در کمترین زمان پیشران احتراقی را روشن و به حرکت ادامه دهد. نتیجه این امر، کارکرد موتور

احتراقی در نقاط بهینه و همچنین کاهش مصرف سوخت و آلودگی خودرو است. این نوع از قوای محرکه دونیرو با توجه به مصرف کمتر جریان برقی در مقایسه با سایر خودروهای دونیرو نیاز به تغذیه با اتصال به شبکه برق را ندارند. [۱-۲]



پیشران احتراق داخلی پیشران برقی مدل جریان مستقیم به متناوب انبارۀ با اختلاف پتانسیل قوی

شکل ۱: نحوه ارتباط اجزا مختلف سامانه BISG [۳]

در راستای پیشرفت فناوری قوای محرکه نیم‌دونیرو BISG، در سالیان اخیر، تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی بسیار صورت پذیرفته است. شرکت تویوتا موتوری با فناوری نیم‌دونیرو ارائه داد که ضمن کاهش مصرف سوخت، در زمان خاموشی موتور احتراقی امکان کارکرد سامانه‌های تهویه مطبوع خودرو هم با پیشران برقی وجود داشته باشد. [۴]

ران بائو با پژوهشی در شرکت ریکاردو انگلستان تأثیر سازوکار نیم دونیرو بر بازدهی پیشران و قابلیت آن برای کاهش مصرف سوخت را بررسی کرد [۵].

پژوهشگرانی انتخاب نوع دستگاه برقی در فناوری‌های نیم دونیرو را مطالعه کردند و به منظور انتخاب صحیح دستگاه برقی، سه نوع دستگاه سه حالت از نوع القایی، آهنربا دائم و رلوکتانسی بررسی شد. در نهایت دستگاه برقی القایی با توجه به قیمت ارزاتر، توان بیشینه و واپایی آسان تر و پایداری بیشتر با وجود بازدهی ضعیف تر و اندازه بزرگ تر نسبت به دیگر گزینه‌ها مناسب سامانه‌های BISG اعلام شدند [۶-۹].

یونگ هو جونگ با استفاده از معادلات حاکم بر حرکت طولی و اجزای داخلی یک خودرو ۱,۴ لیتر و دستگاه برقی ۱۰ کیلو وات، و تبدیل انرژی برقی به انرژی سوخت با استفاده از ضریب ارزش سوخت، الگوی نرم‌افزاری را در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب ارائه می‌دهد و به روشی مناسب برای واپایی بهینه برای تقسیم توان بین دو پیشران با هدف کاهش مصرف سوخت، دست می‌یابد و آن را با روش‌های دیگر مقایسه می‌نماید [۹].

در تحقیق دیگر شبیه‌سازی خودرو نیم‌دونیرو BISG را در نرم‌افزارهای GT-Drive و متلب آقای ددوک لی و جف چری انجام دادند تا اثر این سامانه بر کاهش مصرف سوخت و تولید گازهای گلخانه‌ای را بررسی کنند و روش واپایی جدیدی را ارائه نمایند [۱۰].

⁴ Belt Alternator Starter

⁵ Belt-driven Starter Generator

⁶ Electric Assist

¹ Hybrid Electric Vehicle

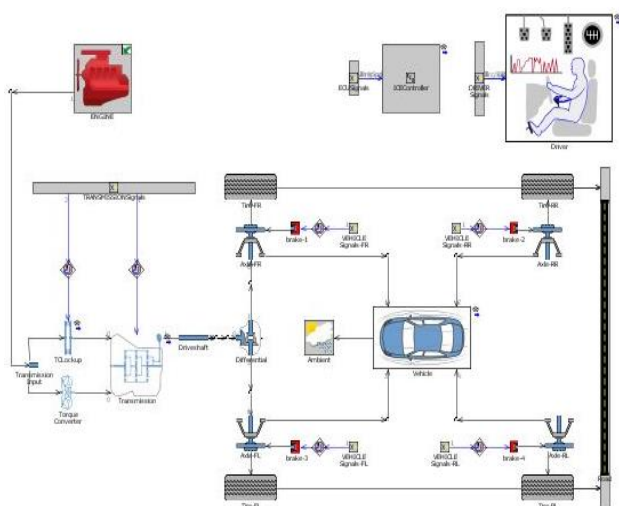
² Charge

³ Mild Hybrid Electric Vehicle

۱- تعریف قوانین مهار و مشخصه‌های مهار بر اساس برنامه نویسی دینامیکی
 ۲- الگوی وراثت که مقادیر غیرخطی این مشخصه‌ها را در زمان کم برای چرخه رانندگی معلوم محاسبه می‌کند [۱۴].
 در این پژوهش ابتدا با استفاده نرم‌افزار GT-Suite، خودرو با پیشران احتراق داخلی الگوسازی و سپس با اتصال پیشران برقی، انباره و سایر تجهیزات، سامانه BISG پیاده‌سازی شد. عملکرد این دو خودرو، در سیکل‌های NEDC و WLTC بررسی و میزان بهبود مصرف سوخت خودرو پس از پیاده‌سازی سامانه نیم دونیرو ۴۸ ولت گزارش شد.

۲- مواد و روش‌ها

نرم‌افزار GT-Suite به سبب صحت محاسبات، جامع بودن و دارا بودن رابط کاربری گرافیکی خوب، مورد اعتماد پژوهشگران و صنایع خودروسازی خارجی و داخلی از قبیل ایرانخودرو و سایپا است. از این نرم‌افزار می‌توان برای شبیه‌سازی خودروهای تک نیرو و دونیرو استفاده کرد.



شکل ۲: اجزا تشکیل دهنده الگو خودرو تک‌نیرو [۱۵]
 ساختار خودرو تک‌نیرو

سامانه‌های تشکیل دهنده خودرو تک نیرو عبارت‌اند از: خودرو، راننده و محیط، پیشران احتراقی و سامانه انتقال قدرت که در شکل ۲ نشان داده شده و به دلیل اهمیت بیشتر مدلسازی خودروی دونیرو و همچنین یکسان بودن مبانی آنها به ارائه ساختار خودرو دونیرو اکتفا شده است.

در سال ۲۰۱۸ تحقیق دیگری از دانشگاه آخن منتشر شد که قسمت‌های مختلف یک خودرو نیم‌دونیرو BISG در نرم‌افزارهای متفاوتی شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی برای خودرویی با قوای محرکه بنزینی پرخوران ۳ استوانه با فشار هوای ورودی ۲،۳ بار و پیشران برقی با توان حداکثری ۱۲،۵ کیلووات انجام شد.
 در این تحقیق شبیه‌سازی جامعی با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب برای پیش‌بینی تأثیر فناوری نیم‌دونیرو انجام گرفته است. ورودی‌های این شبیه‌سازی در موتور احتراق داخلی از نرم‌افزار GT Power، در جعبه دنده و سامانه انتقال قدرت از نرم‌افزار Simulation X و در دینامیک بدنه و چرخ‌ها از نرم‌افزار dSpace استفاده شده است. در مرحله بعد برای ارزیابی جواب‌ها، موتور احتراق داخلی در اتاق آزمون جایگزین الگوی شبیه‌سازی شده نسبت به با دیگر شبیه‌سازی‌ها شد [۱۱].

سراو و اونوری در پژوهشی، تبدیل مساله مدیریت انرژی در خودرو دونیرو به یک مساله ریاضی را توضیح دادند و سه روش بهینه‌سازی برنامه نویسی دینامیک^۱، قاعده کمینه سازی پنتریاگین^۲ و راهبرد کاهش مصرف سوخت معادل^۳ را باهم مقایسه کردند.
 برنامه نویسی دینامیک و قاعده کمینه‌سازی پنتریاگین به مصرف سوخت‌های مشابهی منتج شدند. اگرچه استفاده از روش راهبرد کاهش مصرف سوخت معادل، تفاوت چشمگیری با نتیجه دو روش دیگر ندارد، اما قابلیت پیاده‌سازی در خودرو را دارد [۱۲].
 بیشتر مطالعات با توجه به شرایط ماندگار عملکرد پیشران احتراقی صورت گرفته است در حالی که به علت تأخیر در هوای ورودی پیشران احتراقی و تغییرات دمایی آن، مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها، در حالت تغییر نقطه کاری پیشران با حالت ماندگار متفاوت است.

به همین دلیل در پژوهشی که سال ۲۰۱۷ انجام شد، ابتدا با استفاده از راهبرد کاهش مصرف سوخت معادل، تقسیم توان بهینه با توجه به دینامیک‌های کند، مثل حالت تغذیه انباره^۴ بدست آمد.
 در مرحله بعد، معادلات حاکم بر تأخیر هوای ورودی و افزایش آلاینده‌گی NOx وارد مساله شد و با در نظر گرفتن حالت گذرای پیشران احتراق داخلی، تولید NOx را به حداقل رساند. این امر با تغییر آرام گشتاور پیشران احتراقی و جبران گشتاور مورد نیاز راننده توسط پیشران برقی محقق شد [۳ و ۱۳].
 تقسیم توان بهینه در یک خودرو دونیرو از نوع قابل تغذیه^۵ تحت تأثیر سه عامل، تغذیه اولیه، چرخه رانندگی و طول مسیر است. نیکولاس دنیس، روش ژنتیکی عرضه کرد که در زمان کم این مساله را حل نماید. این روش شامل موارد زیر است:

^۴ State of Charge (SOC)

^۵ Plug-In

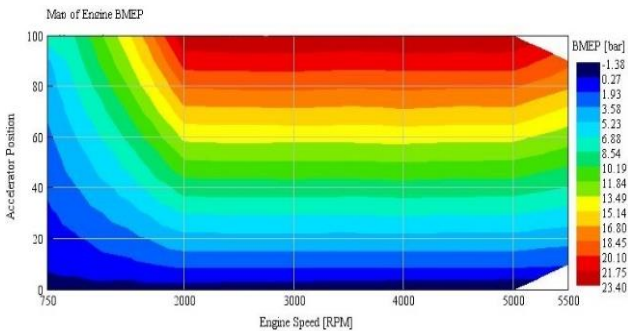
^۱ Dynamic Programming

^۲ Pontryagin's Minimum Principle

^۳ Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)

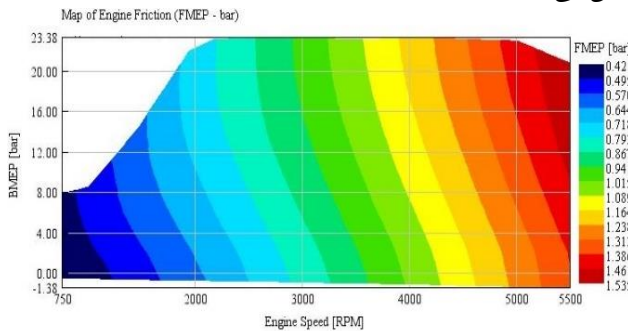
۲-۲- پیشران احتراق داخلی

معادلات پیچیده و زیادی که بر این عضو حاکم است، معمولاً پژوهشگران را به استفاده از داده‌های تجربی سوق می‌دهد. این اطلاعات می‌تواند در اتاق‌های آزمون پیشران احتراق داخلی و با استفاده از دینامومتر و تجهیزات دیگر، به دست آید. به منظور پیاده سازی این اطلاعات، کافی است آن‌ها را به صورت نقشه به نرم‌افزار انتقال داد. نمودارهای شکل ۴ و ۵ از مهمترین ورودی‌های منتقل شده به نرم‌افزار هستند.



شکل ۴: فشار موثر ترمزی

نمودار شکل ۴ فشار ترمزی موثر را بر حسب دریچه گاز و سرعت موتور نشان می‌دهد.



شکل ۵: فشار موثر اصطکاکی

برای محاسبه هدررفت انرژی در پیشران احتراق داخلی باید اطلاعات مربوط به فشار موثر اصطکاکی مطابق شکل ۵ در دسترس نرم‌افزار قرار گیرد.

۲-۳- جعبه دنده و اتصالات مکانیکی

معادلات ۱ الی ۳، روابط گشتاور و توان پیشران و گشتاور مقاوم را نشان می‌دهند.

$$T_{coupler} = T_{engine} + T_{BISG} \cdot r_{BISG} \cdot \beta_{eff} \quad (1)$$

$$T_{loss} = T_{FMEP} + T_{inertia} = T_{FMEP} + I \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{eng-on} = T_{coupler} \cdot \omega \\ P_{eng-off-rngen} = \varphi \cdot P_{tractive} + T_{loss} \omega \end{cases} \quad (3)$$

جدول ۱: سامانه‌های مهم در الگوسازی خودرو دونیرو

سامانه	اجزا
خودرو	محور، چرخ، شاسی، بدنه و ایرودینامیک
پیشران احتراقی	پیشران احتراق داخلی و تجهیزات مکانیکی متصل
سامانه جعبه دنده و اتصالات مکانیکی	جعبه دنده و کلاچ و اتصالات
انباره	انباره لیتیوم- یون، مبدل جریان مستقیم، مبدل جریان متناوب، تجهیزات برقی
پیشران برقی	پیشران برقی و مولد جریان متناوب
راننده و محیط	چرخه رانندگی، شرایط جاده
مهار	سامانه مهار دونیرو، سامانه مهار انباره

ساختار خودروی دونیرو

هفت سامانه مهم در الگوسازی یک خودرو دونیرو عبارت‌اند از: خودرو، راننده و محیط، پیشران برقی، انباره، پیشران احتراقی، سامانه انتقال قدرت، و مهار (جدول ۱).

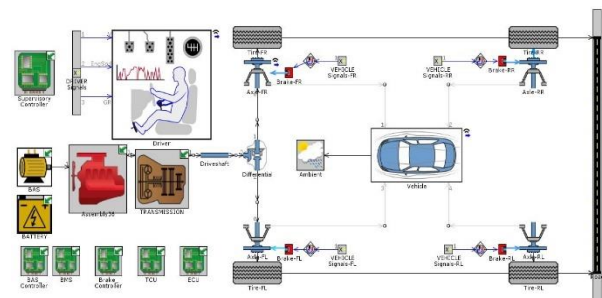
۲-۱- خودرو

خودروی مورد بررسی در الگو شبیه‌سازی شده، دارای جزئیات فیزیکی مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲ - جزئیات فیزیکی خودروی الگوسازی شده

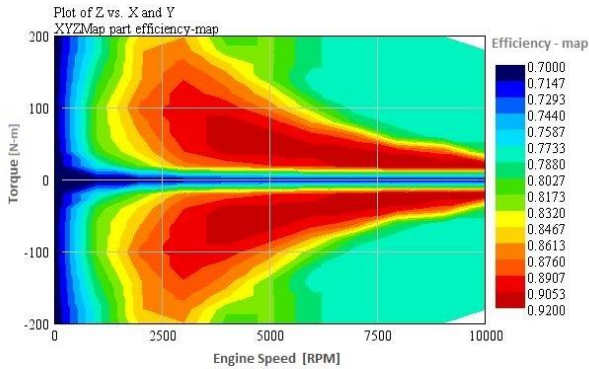
۲,۸۵۲ m	فاصله بین چرخ‌های جلو و عقب
۱۵۰۰ kg	وزن خودرو
۲,۳ m	مساحت جلوی خودرو
۰,۳۳	ضریب پسا
۴ استوانه	نوع موتور
۱۸۰۱ cm ³	حجم موتور
۳۳۴ mm	شعاع دوار چرخ
۳,۴۴۲ m	طول خودرو
۷۵۰ kg/m ³	چگالی سوخت

اجزا تشکیل دهنده الگو خودرو نیم دونیرو BISG در شکل ۳ به اختصار آورده شده است. در این خودرو پیشران برقی از طریق تسمه به پیشران احتراق داخلی متصل می‌گردد.



شکل ۳: اجزا تشکیل دهنده الگو خودرو نیم دونیرو

کاهش دهد. قابلیت مولدی بودن آن می‌تواند بخشی از انرژی تلف شده در ترمزها را ذخیره نماید.



شکل ۶: بازده و گشتاور پیشران بر حسب سرعت دورانی موتور احتراقی

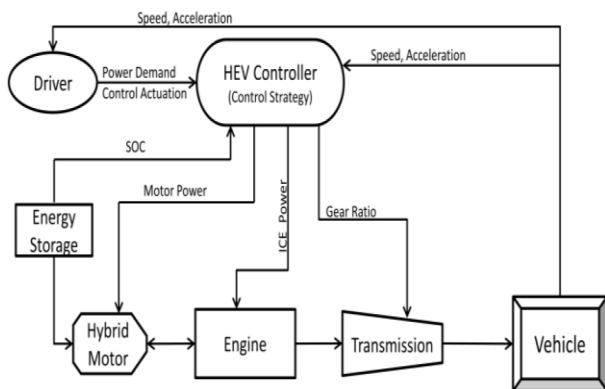
در این پژوهش یک پیشران برقی با توان ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی پیشران، اطلاعاتی چون، بازده، توان و گشتاور پیشران بر حسب سرعت دورانی مورد نیاز است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۶- راننده و محیط

به منظور مقایسه مصرف سوخت خودرو تک‌نیرو و نیم دونیرو، چرخه‌های راندگی WLTC و NEDC به عنوان چرخه هدف راننده در نظر گرفته شدند. همچنین جاده بدون شیب و باد فرض شد.

۲-۷- مه‌ار

روش تعیین روشن یا خاموش شدن پیشران احتراق داخلی و تصمیم‌گیری در ارتباط با حالت عملکرد پیشران برقی، باید به گونه‌ای طراحی گردد که علاوه بر ایجاد رضایت در راننده و برآورده ساختن خواست او، سرعت قابل قبول، کمترین مصرف سوخت و انتشار آلاینده را به دنبال داشته باشد.



شکل ۷: نحوه ارتباط مه‌ارکننده با اجزا سامانه الگوسازی شده

مه‌ارکننده باید به گونه‌ای طراحی گردد که با بررسی ورودی راننده (پدال‌ها)، تغذیهٔ انبار، سرعت و شتاب خودرو همچنین با در نظر گرفتن

$I \frac{d\omega}{dt}$ گشتاور مقاوم حاصل از شتاب زاویه‌ای پیشران احتراق داخلی به علت لختی دورانی است. φ یک ضریب تجربی برای در نظر گرفتن بازده بازیابی انرژی در زمان ترمزگیری است. در حالت بازیابی انرژی توان حاصل از گشتاور مقاوم با توان حاصل از انرژی جنبشی بازیابی شده خودرو، به پیشران برقی که در حالت مولد قرار دارد، منتقل می‌گردد. این توان در نقشه بازده پیشران برقی، ضرب می‌گردد.

$$P_{rgen_brake} = P_{eng-off-rgen} \cdot \psi \quad (4)$$

توان و گشتاور حاصل از شفت خروجی پیشران احتراقی به جعبه دنده متصل می‌گردد. الگو شبیه‌سازی شده از یک جعبه‌دنده ۶ سرعته بهره می‌برد. نسبت دنده‌ها که در جدول ۳ گزارش شده است، روی زمان تعویض دنده و بازده انتقال قدرت در شبیه‌سازی تاثیرگذار است.

جدول ۳: مشخصات جعبه دنده ۶ سرعته خودکار

شماره دنده	نسبت دنده
۱	۴,۴۸۴
۲	۲,۸۷۲
۳	۱,۸۴۲
۴	۱,۴۱۴
۵	۱
۶	۰,۷۴۲

۲-۴- انبار

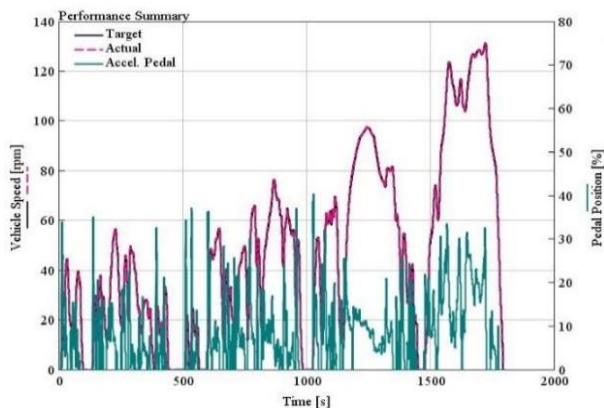
انبار مورد استفاده در خودرو دونیرو، ۴۸ ولت و از نوع لیتیوم-یون با ظرفیت ۰/۵ کیلووات ساعت است. تغییرات ولتاژ و مقاومت انبار بر حسب سطح تغذیه و دما، حداکثر و حداقل سطح تغذیهٔ مجاز، از جمله اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار برای شبیه‌سازی رفتار انبار است. معمولاً در خودروهای نیم‌دونیرو، از پیشران و مولد برقی متناوب استفاده می‌شود. در حالی که سایر اجزا به جریان مستقیم نیاز دارند. به همین دلیل جریان متناوب تولیدی، توسط یک مبدل، به جریان مستقیم تبدیل و در انبار ۴۸ ولت ذخیره می‌گردد.

نظر به اینکه مصرف‌کننده‌های خودرو، با ولتاژ ۱۲ ولت عمل می‌کنند، یک مبدل دیگر، اختلاف پتانسیل ۴۸ ولت را به ۱۲ ولت تغییر می‌دهد. در صورت نیاز به عملکرد ماشین برقی به عنوان پیشران، جریان ۴۸ ولت مستقیم به ۴۸ ولت متناوب تبدیل می‌شود و در اختیار پیشران برقی قرار می‌گیرد.

۲-۵- پیشران برقی

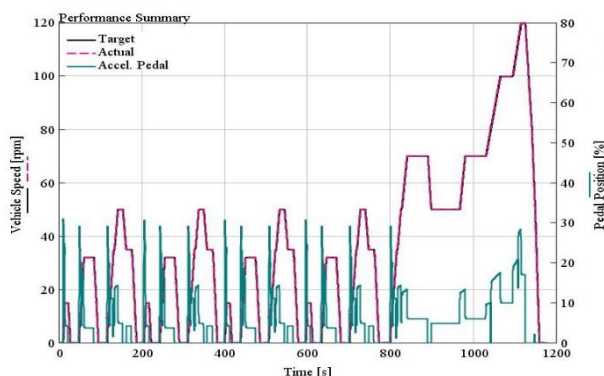
پیشران برقی با گشتاور زیاد در سرعت‌های پایین می‌تواند کمک به‌سزایی در پیشران اولیه و خاموش/روشن شدن سریع خودرو در مواقع سکون داشته باشد. همچنین می‌تواند با بازده بالای خود در شرایطی که پیشران احتراقی بازده بسیار کمی دارد، مصرف سوخت را

خودرو، می‌توان گفت چرخه NEDC تغییرات حالت رانندگی کمتری نسبت به چرخه WLTC دارد. به سبب این امر انتظار می‌رود در چرخه NEDC مدت زمان خاموشی پیشران احتراق داخلی طولانی‌تر از این مقدار در چرخه WLTC باشد.



شکل ۸: عملکرد خودرو تک نیرو در چرخه رانندگی WLTC

مصرف سوخت برای عملکرد خودرو در چرخه WLTC ۹/۶ لیتر بر ساعت است.



شکل ۹: عملکرد خودرو تک نیرو در چرخه رانندگی NEDC

شکل ۹ عملکرد خودرو تک نیرو برای چرخه NEDC را نشان می‌دهد که مصرف سوخت آن ۸٫۶ لیتر بر ساعت است. با پیاده سازی الگو سامانه نیم دونیرو ۴۸ ولت مصرف سوخت در چرخه‌های یاد شده محاسبه گردید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ عملکرد خودروی نیم‌دونیرو در چرخه WLTC را نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که خودروی شبیه‌سازی شده با انحراف اندک مسیر چرخه رانندگی WLTC را می‌پیماید.

معادلات دینامیکی، مشخصات پیشران برقی، پیشران احتراقی و سایر مشخصات خودرو تقسیم توان بهینه را محاسبه نماید. شکل ۷ نحوه ارتباط اجزا سامانه با مهارکننده را نشان می‌دهد.

در شبیه‌سازی انجام شده، روش مهاری ساده به کمک قیود مقالات [۱۶-۱۷] با توجه به حالت اولیه، شرایط عملکرد خودرو و ورودی‌های عملی، حالت ثانویه را تعیین می‌نماید (جدول ۴).

جدول ۴: روش مهار خودروی شبیه‌سازی شده

No	Action Description	Action	Condition	Output
1	Init	If	time<0.1	1
2	1 to 2	Elseif	State=1 && AccelPP>0	2
3	2 to 3	Elseif	State=2 && RPM>800	3
4	3 to 4	Elseif	State=3 && BrakePP>0	4
5	4 to 3	Elseif	State=4 && AccelPP>0	3
6	4 to 1	Elseif	State=4 && VehSpeed<0.01 && SOC>0.75	1
7	3 to 5	Elseif	State=3 && VehSpeed<0.01 && SOC<=0.75	5
8	5 to 3	Elseif	State=5 && AccelPP>0 && SOC<0.75	3
9	5 to 1	Elseif	State=5 && BrakePP>0 && VehSpeed<1 && SOC>0.75	1
#	4 to 5	Elseif	State=4 && TransInSpd<500 && SOC<=0.75	5
#	Stay	Else		State

حالت‌های عملکردی خودرو به ۵ دسته زیر تقسیم شده‌اند:

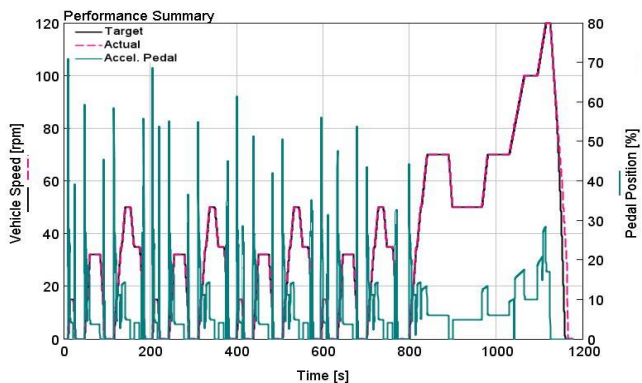
- ۱- توقف خودرو^۱
 - ۲- روشن شدن موتور احتراق داخلی^۲
 - ۳- عملکرد موتور احتراقی به تنهایی^۳
 - ۴- ترمزگیری^۴
 - ۵- دور آرام^۵
- با توجه به این حالت‌ها در مورد روشن/خاموش کردن موتور احتراق داخلی^۶، قطع و وصل کردن کلاچ پیشران برقی^۷، وضعیت ترمز^۸ و حالت کاری پیشران برقی^۹ تصمیم‌گیری می‌شود. برای مثال هنگامی که موتور احتراقی روشن است و راننده پدال ترمز را می‌فشارد، خودرو در حالت عملکردی ۴ قرار می‌گیرد. در اینصورت موتور احتراق داخلی روشن و کلاچ پیشران برقی متصل است؛ همچنین ترمز در وضعیت بازبایی و پیشران برقی در حالت مولد قرار دارد.

۳- نتایج و بحث

ابتدا عملکرد خودرو تک‌نیرو در چرخه رانندگی WLTC و NEDC مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج سرعت حاصل از شبیه‌سازی برای هر دو چرخه در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده‌اند. الگوی شبیه‌سازی شده، هر دو چرخه را با انحراف اندک طی کرده است. با توجه به وضعیت اهرم گاز و سرعت

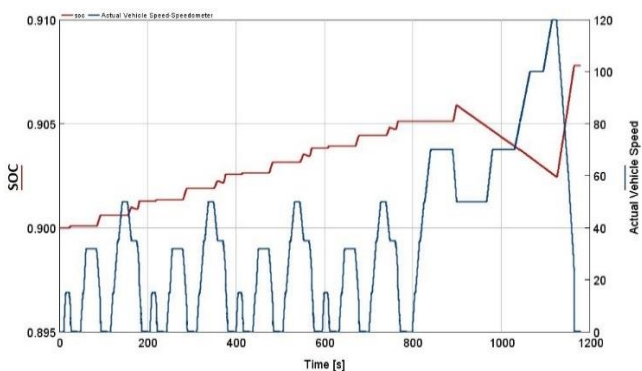
6 Engine On/Off
7 BAS Cluth State
8 Brake Switch
9 BAS Mode

1 Vehicle Stopped
2 Starting Engine
3 Engine Only
4 Braking
5 Idle



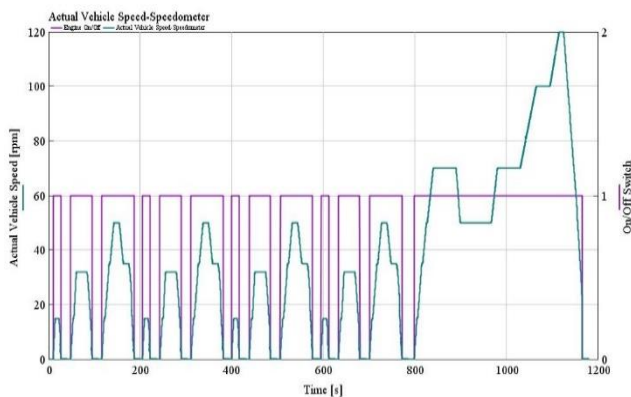
شکل ۱۳: عملکرد خودرو نیم دونیرو طی چرخه راندگی NEDC

بر اساس نمودار شکل ۱۴ سطح تغذیه انباره (SOC) طی چرخه NEDC از ۰,۹ به ۰,۹۰۸ درصد به درصد ظرفیت انباره رسیده است.



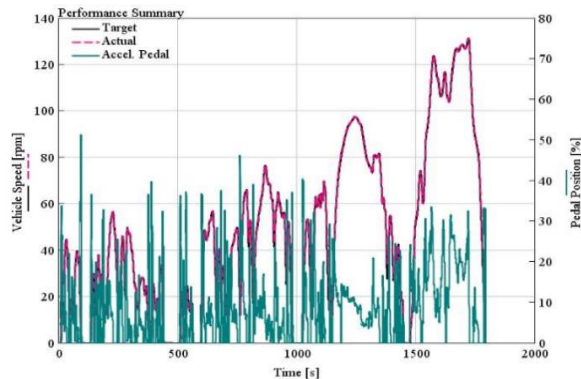
شکل ۱۴: تغییرات سطح تغذیه انباره طی چرخه راندگی NEDC

شکل ۱۵ نقاطی را که وضعیت پیشران احتراق داخلی از روشن به خاموش یا بالعکس تغییر کرده است در طول مسیر پیمایش چرخه NEDC را نشان می‌دهد. طی چرخه NEDC پیشران احتراق داخلی ۲۴۸ ثانیه معادل ۲۱ درصد از کل زمان چرخه، در حالت خاموش قرار دارد. این در حالی است که طی ۱۸۰۰ ثانیه در چرخه WLTC پیشران احتراق داخلی تنها ۱۴۴ ثانیه معادل ۸ درصد از کل زمان چرخه، در حالت خاموش قرار دارد.



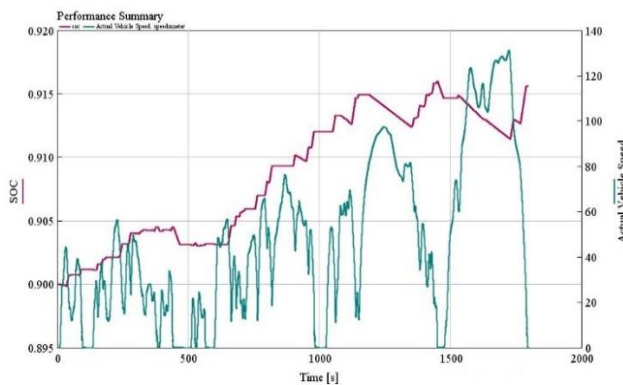
شکل ۱۵: وضعیت روشن/خاموش پیشران احتراق داخلی طی چرخه

NEDC



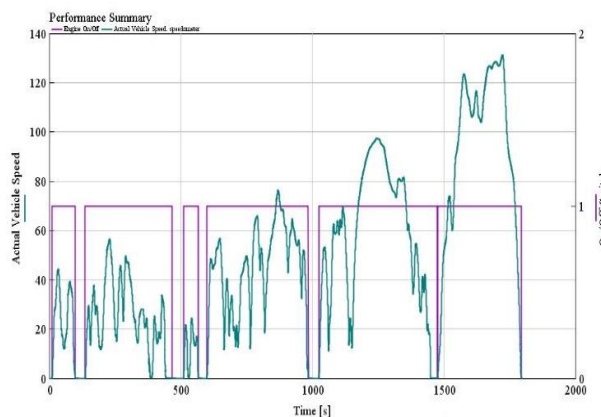
شکل ۱۰: عملکرد خودرو نیم دونیرو طی چرخه راندگی WLTC

بر اساس نمودار شکل ۱۱ سطح تغذیه انباره (SOC) طی چرخه WLTC از ۰,۹ به ۰,۹۱۶ درصد به درصد ظرفیت انباره رسیده است.



شکل ۱۱: تغییرات سطح تغذیه انباره طی چرخه راندگی WLTC

شکل ۱۲ نقاطی را که وضعیت پیشران احتراق داخلی از روشن به خاموش یا بالعکس تغییر کرده است در طول مسیر پیمایش چرخه WLTC نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: وضعیت روشن/خاموش پیشران احتراق داخلی طی چرخه

WLTC

نمودار شکل ۱۳ سرعت خودروی نیم‌دونیرو شبیه‌سازی شده را در چرخه NEDC نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، خودرو چرخه یاد شده را به درستی طی کرده است.

T_{FMEP}	N.m	گشتاور مقاوم اصطکاکی،
$T_{inertia}$	N.m	گشتاور مقاوم ناشی از لختی،
P_{eng_on}	kW	توان پیشران برقی در حالت پیشران،
$P_{eng_off_rge}$	kW	توان پیشران برقی در حالت ترمزگیری،

مراجع و منابع

- [1] F. Atzler, M. Wegerer, F. Mehne, S. Rohrer, C. Rathgeber, and S. Fischer, "Fuel Consumption and Emissions Effects in Passenger Car Diesel Engines through the Use of a Belt Starter Generator," SAE Tech. Pap., vol. 2015-April, no. April, 2015.
- [2] Y. G. Liao and A. M. Quail, "Traction Motor Sizing for Optimal Fuel Economy in Propulsion Hybridization," pp. 1-11, 2012.
- [3] Continental, "Electrical architecture of a dual voltage board net with a 48 V system," 1. [2018]. Available: www.continental.com.
- [4] M. O-Hori, K. Tanei, Y.-I. Yano, K. Hayama, S. Sako, and T. Ezo, "Engine starting system development by belt drive mechanism," SAE Tech. Pap., 2002.
- [5] R. Bao, V. Avila, and J. Baxter, "Effect of 48 V Mild Hybrid System Layout on Powertrain System Efficiency and Its Potential of Fuel Economy Improvement," SAE Tech. Pap., 2017.
- [6] Yimin Gao, M. Ehsani, and J. Miller, "Hybrid Electric Vehicle: Overview and State of the Art," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE., no. 2. pp. 307-316, 2005.
- [7] M. Ehsani, Y. Gao, and S. Gay, "Characterization of electric motor drives for traction applications," IECON'03. 29th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IEEE Cat. No.03CH37468), pp. 891-896, 2003.
- [8] Z. Q. Zhu, W. Q. Chu, and Y. Guan, "Quantitative comparison of electromagnetic performance of electrical machines for HEVs/EVs," CES Trans. Electr. Mach. Syst., vol. 1, no. 1, pp. 37-47, 2017.
- [9] Y. Jun, B. C. Jeon, and W. Youn, "Equivalent Consumption Minimization Strategy for Mild Hybrid Electric Vehicles with a Belt Driven Motor," in SAE Technical Papers, 2017.
- [10] S. Lee, J. Cherry, M. Safoutin, A. Neam, J. McDonald, and K. Newman, "Modeling and Controls Development of 48 V Mild Hybrid Electric Vehicles," SAE Tech. Pap., 2018.
- [11] S. Klein, P. Griefnow, D. Guse, F. Xia, and J. Andert, "Virtual 48V Mild Hybridization: Efficient Validation by Engine-in-the-Loop," in SAE Technical Papers, 2018.
- [12] L. Serrao, S. Onori, and G. Rizzoni, "A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles," J. Dyn. Syst.

پس از اتمام شبیه‌سازی و مقایسه سطح تغذیه اولیه و نهایی، همچنین نتایج حاصل در نرم‌افزار با توجه به تغییر ناچیز سطح تغذیه انباره می‌توان گفت مصرف سوخت خودرو نیم‌دونیرو در چرخه WLTC و NEDC به ترتیب ۵ و ۹ درصد نسبت به خودرو معمولی کاهش یافته است. جدول ۵ نتایج این پژوهش را مقایسه می‌کند.

جدول ۵: نتایج نهایی شبیه‌سازی خودرو تک نیرو و دونیرو

چرخه	NEDC	WLTC
خودرو تک‌نیرو (l/100 km)	۹٫۶	۸٫۶
خودرو نیم‌دونیرو (l/100 km)	۸٫۸	۸٫۲
کاهش مصرف سوخت (%)	۹	۵
سطح تغذیه اولیه	۰٫۹	۰٫۹
سطح تغذیه پایانی	۰٫۹۰۸	۰٫۹۱۶

۴- نتیجه‌گیری

هزینه ارزان سامانه نیم‌دونیرو ۴۸ ولت به سبب تغییرات کم در قوای محرکه تک نیرو و قطعات، به‌مراه قابلیت اطمینان آن و همچنین کاهش قابل توجه مصرف سوخت، این سامانه را یکی از مهمترین انتخاب‌های خودروسازان ساخته است. این سامانه می‌تواند در شرایط آمد و شد سنگین کلان‌شهرهایی چون تهران که خودروها زمان زیادی را ساکن هستند، کاهش مصرف سوخت قابل قبولی را به دنبال داشته باشد. یکی از نقاط قوت این سامانه، قابلیت نصب روی خودرو پس از تولید در کارخانه است. در این صورت، مشتری برای بهره‌مند شدن از فناوری نیم‌دونیرو احتیاج به تعویض خودرو ندارد. به همین دلیل این سامانه می‌تواند با نصب در خودروهای سطح شهرها به خصوص تاکسی‌های درون شهری، سهم حائز اهمیتی در کاهش آلودگی و مصرف سوخت داشته باشد. تهیه علمی چرخه رانندگی مخصوص تهران و سایر کلان‌شهرها می‌تواند به ارزیابی بهتر عملکرد سامانه‌های دونیرو کمک کند. این کار مستلزم پژوهش‌های آماری دقیق و گسترده است. خودروسازان با ارائه اطلاعات دقیق از مشخصات خودرو، می‌توانند سهم به‌سزایی در پیشرفت تحقیقات در زمینه خودروهای دونیرو داشته باشند.

فهرست علائم

$T_{coupler}$	N.m	گشتاور خروجی چرخ طیار،
T_{engine}	N.m	گشتاور خروجی پیشران احتراقی،
T_{BISG}	N.m	گشتاور خروجی پیشران برقی،
r_{BISG}		نسبت قطر چرخ تسمه پیشران برقی به چرخ تسمه میل‌لنگ
β_{eff}		بازده انتقال قدرت سامانه تسمه
T_{loss}	N.m	گشتاور مقاوم،

- [15] GAMMA TECHNOLOGIES. 2014. Hybrid and Electric Vehicle Modeling. GAMMA TECHNOLOGIES.
https://www.gtisoft.com/applications/a_Hybrid_Vehicles.php.(accessed 2018)
- [16] Miaohua H, Houyu Y. Optimal design of control strategy for series hybrid electric bus. J Yuhan Univ Technol 2004;4.
- [17] Montazeri-Gh M, Ahmadi A, Asadi A. Driving condition recognition for genetic fuzzy HEV control. Witten-Bommerholz, Germany. March; 2008, p. 65- 70.
- Meas. Control, vol. 133, no. 3, p. 031012, 2011.
- [13] L. Thibault, A. Sciarretta, and P. Degeilh, "Reduction of pollutant emissions of diesel mild hybrid vehicles with an innovative energy management strategy," IEEE Intell. Veh. Symp. Proc., no. Iv, pp. 1274-1279, 2017.
- [14] N. Denis, M. R. Dubois, J. P. F. Trovao, and A. Desrochers, "Power Split Strategy Optimization of a Plug-in Parallel Hybrid Electric Vehicle," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 1, pp. 315-326, 2018.



A Study on Fuel Consumption Reduction Using 48-V Mild Hybrid Technology

Z. Sobhkhiz Miandehi¹, S. V. Hosseini^{2*}, S. Azadi³, M. Jamshidi Kargar⁴

¹ MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Zahrasobhkhiz74@Email.kntu.ac.ir

² Assistance Professor, Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, V_hosseini@Shahroodut.ac.ir

³ Associated Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Azadi@Kntu.ac.ir

⁴ MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran, Mrjamshidi@Aut.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 December 2019

Accepted: 18 February 2020

Keywords:

Mild Hybrid

BISG

Internal Combustion Engine

Fuel Consumption

GT-SUITE

ABSTRACT

Due to the air pollution crisis and increase in greenhouse gases, emission standards are getting tougher gradually. In the other hand reducing the consumption of nonrenewable resources is one of the main goals of the automotive industries in the world. Using electric propulsion along with internal combustion engine is one of the answers. Different designs of Hybrid Electric Vehicles (HEV) have been represented in recent years. Considering the limitations and cost of these vehicles, mild hybrid technology is one of the main choices of manufacturers. These vehicles can be a cost effective choice due to low variation in propulsion system and components, along with its reliability. This paper discusses the reduction of fuel consumption caused by implementing a 48V mild hybrid system in a conventional vehicle. A complete internal combustion engine (ICE) powered vehicle model, is simulated through the GT-SUITE software and fuel consumption during the NEDC & WLTC driving cycles is studied. Based on results, mild hybrid system provides respectively 5% & 9% better fuel economy in WLTC & NEDC driving cycles.

