

ارزیابی عملکرد خودرو سمند با سامانه پیشرانس احتراق داخلی و سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی

محمد رحیم ملک بالا
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
r.malekbala@modares.ac.ir

سعید جوان
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
s.javan@modares.ac.ir

علی محمد یگانه مقدم*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
aliyeganehmoghadam@yahoo.com

فتح اله امی
دانشیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
fommi@modares.ac.ir

پژمان کاظم پور
دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
pejmankazempoor@gmail.com

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۳۱ پذیرش نهایی مقاله: ۹۱/۱۱/۲۳

چکیده

در این پژوهش سامانه پیشرانس دورگه الکتریکی - پیل سوختی جایگزین سامانه متداول احتراق داخلی در یک خودرو سمند گردیده است. سپس خودرو با در نظر گرفتن هر دو سامانه در نرم افزار ADVISOR الگوسازی شده است. برای الگوسازی خودرو ذکر شده الگوی بدنه و چرخ‌ها با در نظر گرفتن کلیه فراسنج‌های مربوط به آن‌ها به این نرم افزار اضافه شده است. در هر دو حالت نتایج بدست آمده از قبیل مصرف سوخت و بازده سامانه در چرخه‌های حرکت مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی علاوه بر کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده و آلایندگی صفر از نظر فراسنج‌های عملکردی سرعت، شتاب و شیب پیمایی قابل رقابت با نمونه احتراق داخلی خود می‌باشد.

کلید واژه‌ها: خودرو سمند، سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی، موتور احتراق داخلی، مصرف سوخت، بازده

۱- مقدمه

تاکنون پژوهش‌گران بسیاری سعی کرده‌اند که وسایل نقلیه با بازده بالا و سازگار با محیط زیست را توسعه دهند. از همین نقطه نظر در سال‌های اخیر پیل سوختی و سیستم‌های دورگه آن به عنوان فناوری تولید توان توجه بسیاری را به خود جلب نموده‌اند [۱]. پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت و اکسیدکننده را بدون هیچ‌گونه احتراق به انرژی الکتریکی، آب و گرما تبدیل می‌کند [۲]. برخلاف باتری‌ها که در آن‌ها انرژی ذخیره گردیده و عمر محدودی دارند در پیل‌های سوختی امکان ورود سوخت به صورت پیوسته وجود دارد و بنابراین محدودیت پرشدن و تخلیه ندارند. مزایایی از قبیل بازده تبدیل انرژی بالاتر (در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی و فناوری‌های متداول) و آلودگی نزدیک به صفر (در صورت استفاده از هیدروژن خالص) پیل سوختی را به گزینه‌ی مناسب برای کاربردهایی نظیر وسایل نقلیه، ایستگاه‌های ثابت تولید توان و ابزارهای الکترونیکی قابل حمل تبدیل کرده است [۱]. انواع مختلفی از پیل سوختی وجود دارد که از میان آن‌ها دو نوع غشاء مبادله پروتون (PEM^۱) و اکسید جامد بیشترین کاربرد را دارند. سامانه‌های دورگه پیل سوختی غشاء مبادله پروتون به دلیل دمای عملکرد پایین و راه‌اندازی سریع برای کاربرد در خودرو، اتوبوس‌های شهری، هواپیما و زیردریایی مناسب می‌باشند [۳]. به منظور استفاده از سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی در خودرو، الگوهای متفاوتی ارائه شده است که در این میان جایگاه استفاده از نرم‌فزار ADVISOR^۲ قابل ملاحظه می‌باشد. به عنوان نمونه در مرجع [۴] با استفاده از نرم‌فزار ADVISOR الگویی از یک خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی برای بررسی تأثیر درجه دنیرویی^۳ بر مصرف سوخت و بازده ارائه شده است. در مرجع [۵] با استفاده از نرم‌فزار ADVISOR یک خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی با دو رویکرد پایش متفاوت الگوسازی و با هم مقایسه شده است. در مرجع [۶] رفتار پویایی سامانه و تأثیر آن در عملکرد یک خودرو دورگه پیل سوختی - ابرخازن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۷] با استفاده از نرم‌فزار ADVISOR اقتصادسوخت^۴ (در خودروهای پیشرفته به صورت درصدی از MPG^۵ خودروهای مینا ارائه شده است) و تلفات انرژی بین الگوهای اولیه و بهینه‌شده یک خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی مقایسه شده است. در این پژوهش تلفات

انرژی در اجزاء خودرو دورگه (شامل چرخ‌ها، موتور، جعبه‌دنده، باتری، سامانه‌های کمکی، مبدل سوخت و ...) در راه‌اندازی گرم و سرد بررسی شده‌ست. در مرجع [۸] الگویی برای خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی با ترکیب موازی در محیط SIMULINK MATLAB به همراه رویکرد پایش جهت معرفی عوامل کلیدی وابسته به اقتصاد سوخت و بهبود حالت پرشدن (SOC^۶) باتری ارائه شده است. به منظور ایجاد دانش در زمینه استفاده از سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی در یک خودرو داخلی، در این پژوهش با استفاده از امکانات نرم‌فزار ADVISOR یک خودرو سمند ال‌یکس با موتور بنزینی XU7JP مجهز به سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی با سوخت هیدروژن الگوسازی و میزان تلفات انرژی اجزاء، مصرف سوخت، بازده و آلاینده‌های آن در حالت راه‌اندازی سرد در چرخه‌های حرکت مختلف به دست آمده و با نمونه احتراق داخلی آن مقایسه شده است.

۲- الگوسازی خودرو سمند احتراق داخلی و دورگه

با استفاده از نرم‌فزار شبیه‌سازی ADVISOR یک سامانه پیل سوختی ۵۰ کیلوواتی همراه با باتری هیدرید فلز نیکل ۲۸ آمپرساعتی و موتور الکتریکی ۸۳ کیلوواتی جایگزین سامانه پیشرانس خودرو سمند ال‌یکس بنزینی شده‌ست. با تبدیل خودرو سمند احتراق داخلی به سمند دورگه الکتریکی - پیل سوختی وزن خودرو به ۱۴۸۴ کیلوگرم افزایش می‌یابد. فراسنج‌های ورودی برای الگوسازی بدنه و چرخ‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

برای الگوسازی موتور احتراقی در پرونده اجرایی نرم‌فزار علاوه بر داده‌های موجود در جدول ۲ نیاز به داده‌هایی شامل نقشه مصرف سوخت و آلاینده‌گی بر حسب دور و گشتاور، وزن موتور و سایر تجهیزات آن و بازده موتور در دورهای مختلف و بسیاری از جزئیات عملکردی موتور می‌باشد که در انحصار شرکت سازنده است. بنابراین برای مقایسه نتایج از یک موتور هم‌ردیف موتور XU7JP استفاده شده است. مشخصات جعبه‌دنده خودرو سمند ال‌یکس نیز با توجه به مرجع [۹] به نرم‌فزار اضافه شده است.

1- Proton Exchange Membrane
2- Advanced Vehicle Simulator
3- Degree of Hybridisation
4- Fuel Economy
5- Mile Per Gallon

6- State of Charge

جدول ۱ مشخصات خودرو سمند [۹]

مشخصات خودرو سمند	مقدار	واحد
وزن تقریبی خودرو بدون سرنشین و تجهیزات اضافی	۱۲۲۰	کیلوگرم
حداکثر وزن مجاز خودرو	۱۶۱۰	کیلوگرم
وزن تقریبی خودرو بدون موتور و جعبه دنده	۸۸۰	کیلوگرم
حداکثر بار بر محور عقب	۷۶۴	کیلوگرم
حداکثر بار بر محور جلو	۸۴۶	کیلوگرم
حداکثر وزن قابل حمل	۱۷۴۳	کیلوگرم
طول خودرو	۴,۵۰۲	متر
عرض خودرو	۱,۷۲۰	متر
ارتفاع خودرو	۱,۴۶۰	متر
ضریب پسای آبرودینامیکی	۰,۳	-
ارتفاع مرکز ثقل	۰,۵۷	متر
سطح پیشانی	۲,۰۰۹	متر مربع
تایر (185/65R15)	-	-
ضریب مقاومت غلتشی چرخ‌ها	۰,۰۱۲	-
فاصله بین چرخ‌ها	۲,۷۶۱	متر
شعاع چرخ‌ها	۰,۳۰۵	متر

جدول ۲ مشخصات موتور بنزینی XU7JP [۹]

نوع موتور	موتور بنزینی	-
درون سوز	خنک‌شونده با آب	-
طرح بندی استوانه	۴ استوانه ردیفی	-
ارتفاع جایبایی × در دهانه استوانه	۸۳ × ۸۱,۴	میلی‌متر
حجم	۱۷۶۱	سانتی‌متر مکعب
نسبت تراکم	۹,۳	-
زنجیره سوپاپ	۲ سوپاپ برای هر استوانه	-
زنجیره محرک میل بادامک	محرک زنجیری	-
بیشینه توان	۱۰۰/۶۰۰۰	کیلووات بر دور در دقیقه
دور آرام موتور	۸۵۰	دور در دقیقه

۲- ۱- سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی

سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی شامل دو منبع انرژی، یک واحد تبدیل انرژی (پیل سوختی) و یک واحد ذخیره انرژی (باتری یا ابرخازن) است. سامانه های دورگه شامل سه دسته سری، موازی و سری- موازی (ترکیبی) می‌باشند. در یک سامانه دورگه سری هر دو منبع ایجاد توان یک واحد تولید قدرت (موتور الکتریکی) را تغذیه می‌کنند. در یک سامانه دورگه موازی، پیل سوختی توان الکتریکی لازم را فراهم می‌کند و همچنین یک باتری به تولید توان کمک می‌کند. در سامانه های ترکیبی پیل سوختی هم‌زمان قادر به پرکردن باتری نیز می‌باشد [۱۰]. کاربرد استک^۱ پیل سوختی به عنوان واحد تولید انرژی در خودرو نیازمند اجزاء جانبی است که اصطلاحاً به آن سامانه کمکی گفته می‌شود. نوع سامانه های به کار رفته کاملاً به نوع پیل سوختی و سوخت مورد استفاده وابسته می‌باشد. با توجه به این موضوع و با در نظر گرفتن ملاحظات و محدودیت‌های موجود، سامانه پیل سوختی مورد استفاده برای پیل سوختی غشاء مبادله پروتون در شکل ۱ مشاهده می‌شود. الگوهای به کار رفته برای اجزاء سامانه، الگوهای کلی گرماپویایی می‌باشند که بر اساس قوانین بقاء جرم و انرژی نوشته شده‌اند. با استفاده از الگوی ارائه شده به راحتی می‌توان فراسنج های ورودی و خروجی به هر جزء را با دقت بسیار خوبی محاسبه نمود. با توجه به شکل سامانه مورد استفاده از ۳ قسمت مجزا شامل سامانه سوخت، هوا و گرما تشکیل شده‌ست. واکنش دهنده‌های مورد استفاده برای سامانه فوق هیدروژن و هوا می‌باشند. هوا از محیط و هیدروژن از مخزن ذخیره سوخت تأمین می‌شود. جهت عملکرد مناسب استک فشار هوا قبل از ورود به استک توسط یک تنجار که توان خود را از یک موتور الکتریکی می‌گیرد، افزایش می‌یابد. به دلیل اهمیت مدیریت آب و پایش رطوبت در عملکرد استک پیل سوختی دو مرطوب‌کننده^۲ مجزا در سامانه سوخت و سامانه هوا تعبیه شده است. در خروجی هر کدام از مرطوب‌کننده‌ها و قبل از ورود واکنش دهنده‌ها به استک یک جداکننده^۳ برای جداکردن آب (مایع) اضافی از واکنش دهنده‌ها و استفاده مجدد آن در سامانه قرار دارد. وظیفه سامانه گرمایی حفظ دمای عملکرد استک پیل سوختی و در نتیجه بهبود بازده سامانه می‌باشد.

1- Stack
2- Humidifier
3- Separator

$$SOC = \frac{Ah_{max} - Ah_{used} (\eta_{Coulomb})}{Ah_{max}} \quad (1)$$

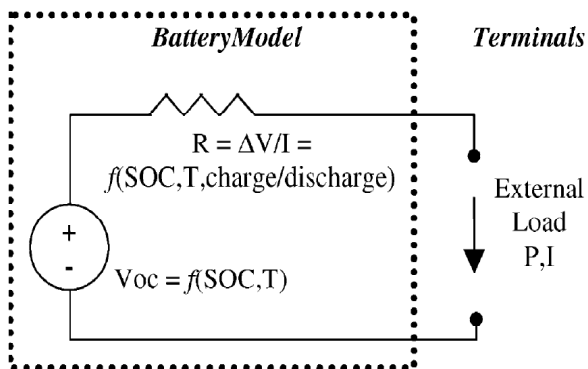
$$Ah_{used} = \int_0^t A, \quad \text{for } A > 0 \text{ discharge,}$$

$$\eta_{Coulomb} A dt, \quad \text{for } A < 0 \text{ charge.}$$

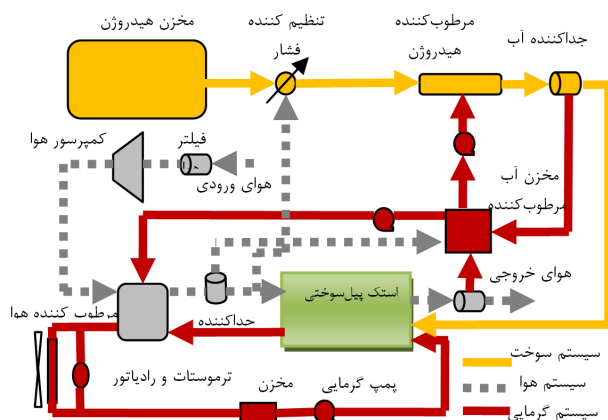
جدول ۳ مشخصات باتری‌های قابل پرشدن [۳]

باتری	اسید سرب	نیکل کادمیوم	هیدرید فلز نیکل	پلیمر لیتیم
انرژی مخصوص (Wh/kg)	۳۵	۴۵	۶۵	۱۰۰
چگالی انرژی (Wh/l)	۱۲۰	۱۱۰	۱۳۵	۱۱۵
توان مخصوص (W/kg)	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰۰	۱۸۰۰
خالی شدن در ماه	۸	۱۰	۳۰	۵
چرخه عمر	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	> ۲۰۰۰
بازده (%)	۷۰	۸۰	۸۰	۸۵
دمای عملکرد (°C)	-۱۵ - ۴۵	-۴۰ - ۷۰	-۳۰ - ۷۰	-۲۰ - ۶۰
هزینه (دلار)	۱۰۵ - ۱۷	۲۰۰ - ۳۰۰	۲۵۰ - ۳۰۰	۲۵۰ - ۱۰۰۰

در رابطه فوق Ah ظرفیت و A جریان باتری است. رواداشت^۸ حالت پرشدن برای الگوی باتری ۵٪ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمودار الکتریکی الگوی مقاومت داخلی باتری مشاهده می‌شود.



شکل ۲ نمودار الکتریکی الگوی مقاومت داخلی باتری [۱۰]



شکل ۱ سامانه پیل سوختی غشاء مبادله پروتون (PEM)

۲-۲- الگوی باتری

انواع مختلفی از باتری‌ها شامل باتری اسید سرب^۱، نیکل کادمیوم^۲، هیدرید فلز نیکل^۳، پلیمر لیتیم^۴ و کلرید نیکل سدیم^۵ برای استفاده در خودروهای الکتریکی و دورگه مورد توجه قرار گرفته‌اند. باتری‌های اسید سرب به دلیل قیمت ارزان و ساختار مستحکم در خودروهای متداول استفاده می‌شوند. باتری‌های هیدرید فلز نیکل در مقایسه با باتری‌های اسید سرب دارای طول عمر طولانی، توان خروجی و بازده پرشدن و خالی شدن بیشتر و قیمت ارزان تر نسبت به باتری‌های پلیمر لیتیم می‌باشند [۵]. در این پژوهش از یک باتری هیدرید فلز نیکل ۲۸ آمپرساعتی استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات باتری‌های مختلف آمده است.

پنج الگوی متفاوت از باتری شامل الگوی مقاومت داخلی^۶، مقاومت-خازن، شبکه عصبی^۷ باتری اسید سرب، الگوی اولیه باتری اسید سرب و الگوی PNGV وجود دارد. الگوی مقاومت داخلی بیشترین کاربرد را در میان الگوهای فوق دارا می‌باشد. در این پژوهش از این الگو برای باتری استفاده شده است. این الگو شامل یک منبع ولتاژ (OVC) و یک مقاومت داخلی می‌باشد. فراسنج‌های فوق با حالت پرشدن باتری (SOC) ، دما و جهت جریان (باتری پر می‌شود یا تخلیه می‌شود) تغییر می‌کنند [۱۱]. حالت پرشدن، ظرفیت قابل استفاده باتری است و مقدار آن بین صفر تا یک (صفر یعنی باتری خالی است و یک یعنی باتری کاملاً پر است) می‌باشد. حالت پرشدن باتری در الگوی مقاومت داخلی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۱].

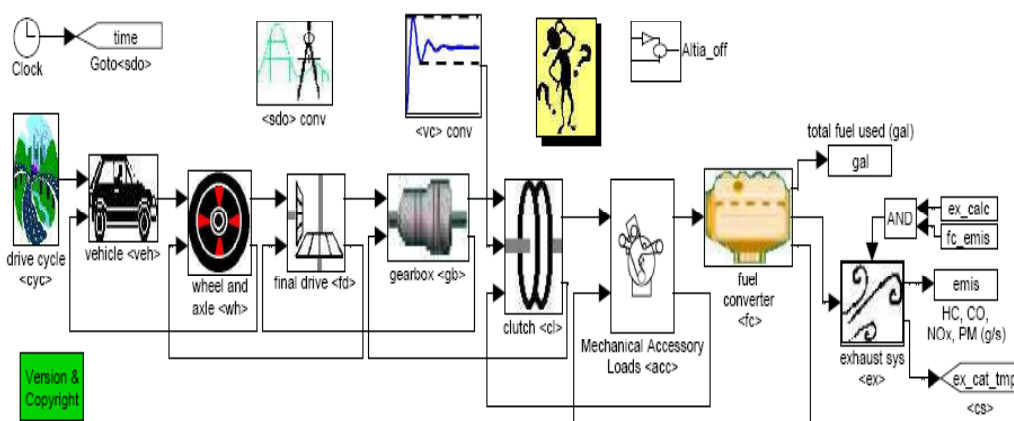
- 1- lead Acid
- 2- Nickel Cadmium
- 3- Nickel Metal Hydride
- 4- Lithium Polymer
- 5- Sodium Nickel Chloride
- 6- Internal Resistance Model
- 7- Neural Network Model

8- Tolerance

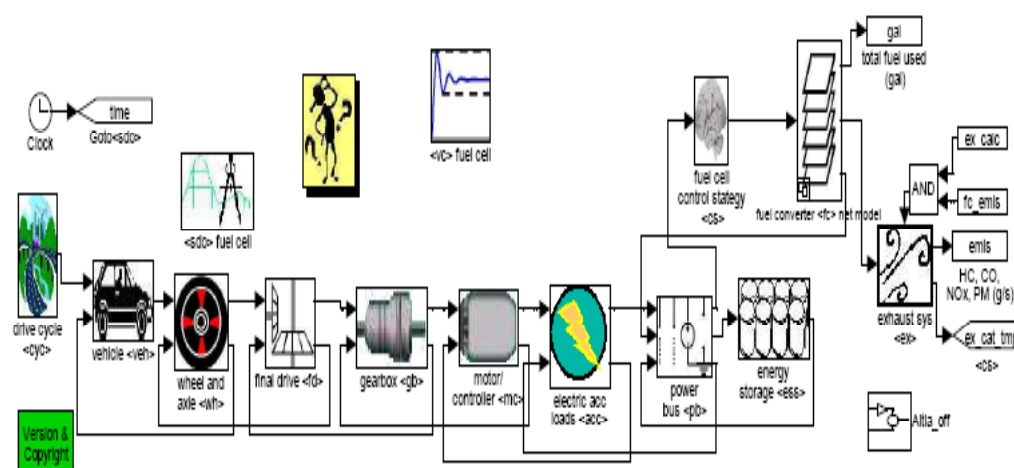
۳- نرم افزار ADVISOR

متکی به چرخه حرکت است. بنابراین نرم‌افزار قابلیت بررسی خودرو در چرخه‌های حرکت گوناگون را دارد و به پژوهشگران فرصت می‌دهد تا به مطالعه اقتصاد سوخت و تولید آلاینده‌ها در چرخه‌های حرکت مختلف و عوامل مؤثر بر آن‌ها بپردازند. الگوهای موجود در این نرم‌افزار الگوی تجربی و همچنین شبه ایستایی می‌باشند [۱۲-۱۳]. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودار شبیه‌سازی خودرو احتراق داخلی و دورگه الکتریکی-پیل سوختی موجود در نرم‌افزار ADVISOR مشاهده می‌شود.

برای الگوسازی خودرو از نرم‌افزار شبیه‌سازی ADVISOR استفاده شده است. ADVISOR نرم‌افزاری قدرتمند است که توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر امریکا^۱ ایجاد گردیده است. این نرم‌افزار می‌تواند عملکرد پویایی خودرو با گروه‌ها، اندازه‌ها و سامانه‌های قوای محرکه مختلف را تحت محیط نرم‌افزار SIMULINK MATLAB شبیه‌سازی نماید. در این نرم‌افزار کلیه الگوها و فایل‌ها به صورت باز^۲ در اختیار کاربر قرار داده شده و کاربر توانایی دسترسی به متن اصلی و ایجاد تغییر در الگوها و فایل‌ها را دارا می‌باشد. شبیه‌سازی خودرو در این نرم‌افزار



شکل ۳ نمودار شبیه‌سازی خودرو احتراق داخلی در نرم‌افزار ADVISOR [۱۴]



شکل ۴ نمودار شبیه‌سازی خودرو دورگه الکتریکی-پیل سوختی در نرم‌افزار ADVISOR [۱۴]

- 1- American National Renewable Energy Laboratory
- 2- Open Source

۴- چرخه حرکت

دو نوع شبیه‌سازی شامل تحلیل چرخه حرکت ۱ و آزمون‌های عملکرد برای یک خودرو در نرم‌فزار ADVISOR وجود دارد. چرخه حرکت چگونگی تغییرات سرعت خودرو بر حسب زمان را نشان می‌دهد [۱۱]. در جدول ۴ مشخصات انواع چرخه حرکت مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود. چرخه حرکت India Urban یک چرخه حرکت ساده و بر اساس حرکت و توقف متناوب با سرعت کم طراحی شده است. چرخه حرکت NEDC^۲ یک چرخه حرکت شهری و برای بررسی آلاینده‌های وسایل نقلیه سبک وزن اروپا طراحی شده است. این چرخه حرکت ترکیبی از چرخه‌های ECE^۳ و EUDS^۴ می‌باشد. چرخه حرکت US۰۶ یک چرخه حرکت با سرعت و شتاب بالا می‌باشد و برای اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی خودرو ارائه شده است. چرخه حرکت VAIL2-REL با محدوده سرعت بین ۴۵ تا ۶۵ مایل بر ساعت و شیب بین ۶- تا ۶ درجه طراحی شده است.

۵- اعتبارسنجی^۵ الگو و نرم‌فزار ADVISOR

برای اطمینان از عملکرد نرم‌فزار ADVISOR و الگوی مورد بررسی با توجه به اینکه نمونه تجربی برای اعتبارسنجی الگو در دسترس نبوده است، نمودارهای به دست آمده از این الگو از نظر چگونگی روند تغییرات با الگوی بررسی شده در مرجع [۵] مقایسه شده است. در این مرجع یک خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی با دو رویکرد پایش متفاوت با استفاده از نرم‌فزار ADVISOR الگوسازی و با هم مقایسه شده است. در جدول ۵ تفاوت‌های دو الگو مشاهده می‌شود.

جدول ۵ مشخصات سامانه دورگه پیل سوختی مورد مطالعه و مرجع [۵]

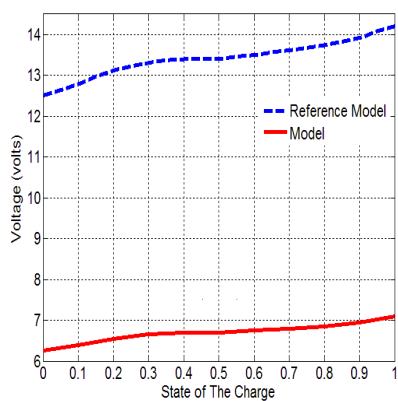
مشخصات	الگو	مرجع
توان سیستم پیل سوختی	۵۰ کیلو وات	۵۰ کیلو وات
باتری	هیدرید فلز نیکل ۲۸ آمپر ساعتی	هیدرید فلز نیکل ۴۰ آمپر ساعتی
توان موتور الکتریکی	۸۳ کیلو وات	۷۵ کیلو وات

جدول ۴ مشخصات چرخه‌های حرکت [۱۴]

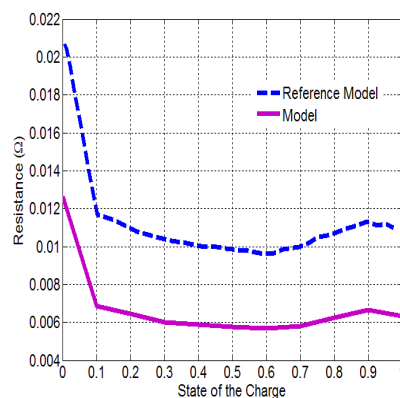
چرخه حرکت	India Urban	NEDC	US06	VAIL2 NREL	واحد
زمان	۲۶۸۹	۱۱۸۴	۶۰۰	۵۹۱۴	s
مسافت	۱۷,۴۹	۱۰,۹۳	۱۲,۸۹	۱۳۹,۲۹	km
سرعت بیشینه	۶۲,۵۶	۱۲۰	۱۲۹,۲۳	۱۲۱,۷۲	km/h
سرعت متوسط	۲۳,۴۱	۲۳,۲۱	۷۷,۲	۸۴,۷۲	km/h
شتاب بیشینه	۱,۷۳	۱,۰۶	۳,۷۶	۲,۲۴	m/s ²
شتاب منفی بیشینه	-۲,۱	-۱,۳۹	-۳,۰۸	-۳,۲	m/s ²
شتاب متوسط	۰,۳۲	۰,۵۴	۰,۶۷	۰,۱۸	m/s ²
شتاب منفی متوسط	-۰,۳۹	-۰,۷۹	-۰,۷۳	-۰,۲۱	m/s ²
زمان استراحت	۲۶۷	۲۹۸	۴۵	۲۷	s
تعداد توقف	۵۲	۱۳	۵	۰	-
شیب بیشینه (رو به بالا)	.	.	.	۱۰,۶	%
شیب متوسط (رو به بالا)	.	.	.	۳,۸	%
شیب بیشینه (رو به پایین)	.	.	.	۷,۷	%
شیب متوسط (رو به پایین)	.	.	.	۲,۹	%

- 1- Drive Cycles
- 2- New European Driving Cycle
- 3- Urban Driving Cycle
- 4- Extra Urban Driving Cycle

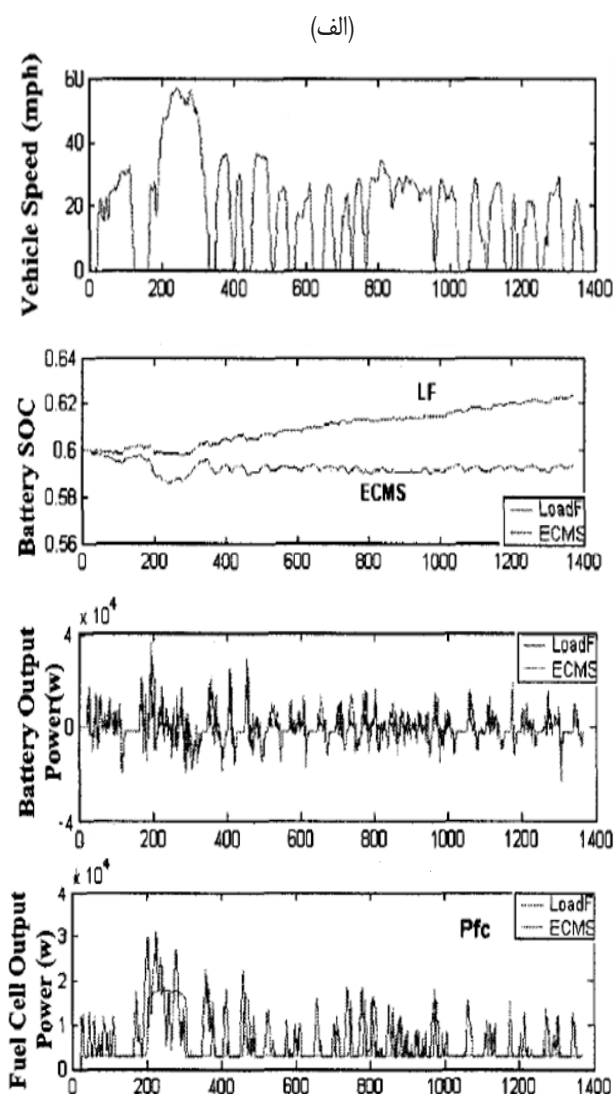
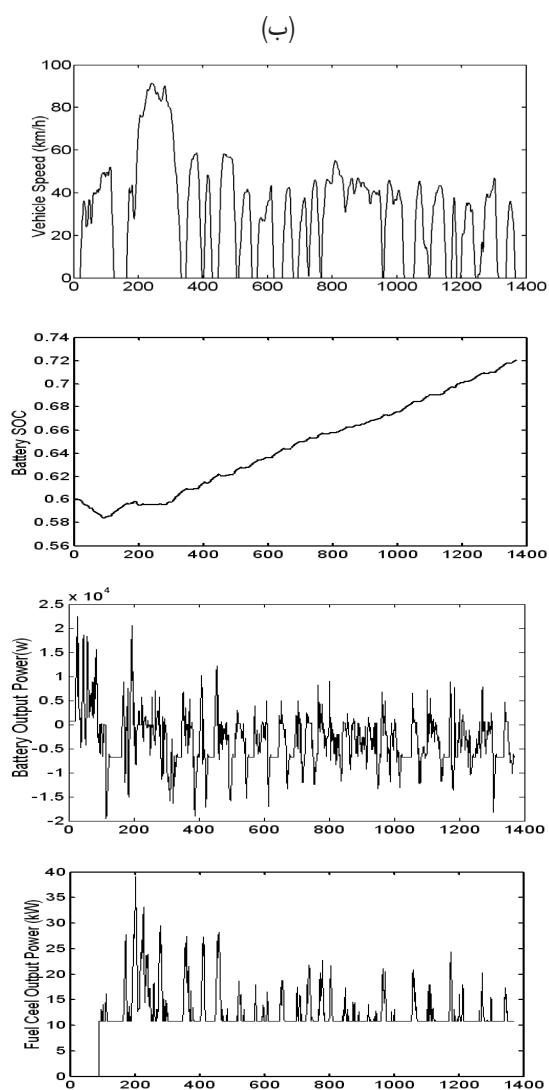
5-Verification



شکل ۶ مقایسه تغییرات ولتاژ مدار باز بر حسب حالت پرشدن باتری



شکل ۵ مقایسه تغییرات مقاومت داخلی بر حسب حالت پرشدن باتری



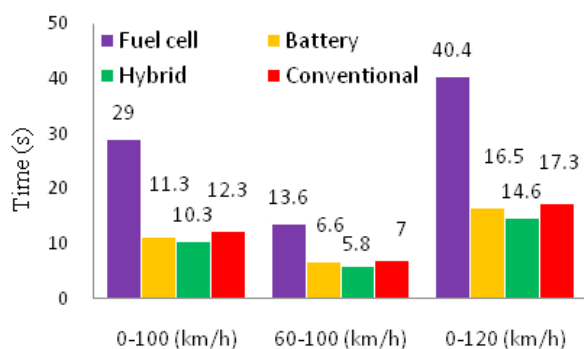
شکل ۷ مقایسه حالت پرشدن باتری، توان خروجی باتری و سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی در چرخه حرکت UDDS

(الف- الگوی موجود در مرجع [۵] و ب- الگوی مورد مطالعه)

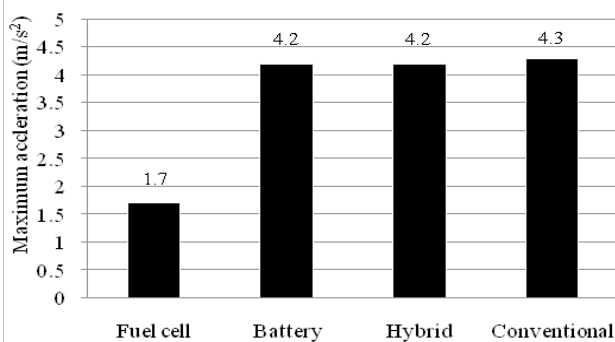
۶- عملکرد خودرو

جدول ۴ شرایط اولیه الگوسازی

مشخصات	مقدار	واحد
دمای محیط	۲۵	°C
ظرفیت گرمایی محیط	۱۰۰۹	J/kg.k
دمای اولیه سامانه ذخیره انرژی	۲۵	°C
دمای اولیه کاپوت ماشین	۲۵	°C
دمای اولیه داخل سیستم پیل سوختی	۲۵	°C
دمای اولیه سطح خارجی سیستم پیل سوختی	۲۵	°C
دمای اولیه موتور- پایشگر	۲۵	°C
حالت پرشدن اولیه باتری	۰,۷	-

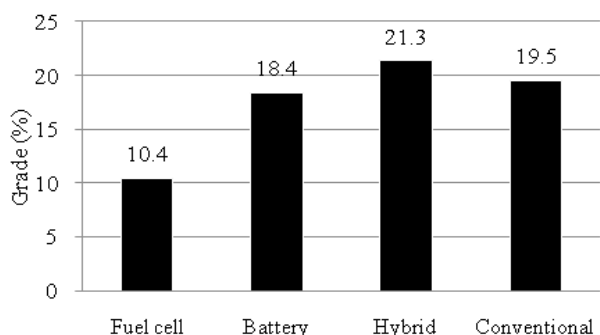


شکل ۸ مقایسه شتاب خودرو احتراق داخلی با خودروهای پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی

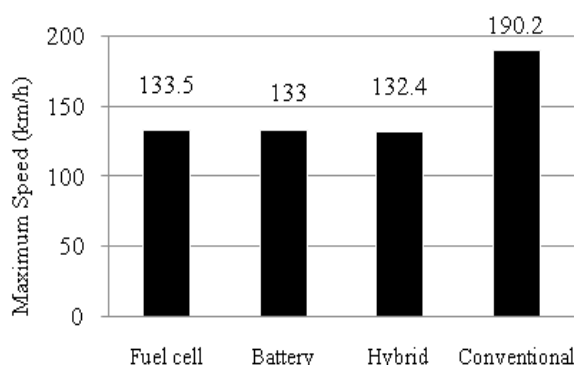


شکل ۹ مقایسه شتاب بیشینه خودرو احتراق داخلی با پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی

برای بررسی عملکرد خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی، شتاب، سرعت و قابلیت شیب پیمایی این خودرو با خودروهای احتراق داخلی، پیل سوختی خالص (بدون باتری) و الکتریکی (خودرو از باتری جهت تولید انرژی استفاده می کند) مقایسه شده است. شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای الگوسازی در جدول ۶ مشاهده می شود. با توجه به استفاده از سامانه پیل سوختی، باتری و یا سامانه دورگه نتایج آزمون شتاب و شیب متفاوت می باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود در هنگام شتاب گیری حالت بهینه استفاده از سامانه دورگه الکتریکی - پیل سوختی می باشد. با توجه به شکل زمان به دست آمده در الگوسازی برای خودرو سمند احتراق داخلی در رسیدن از سرعت صفر تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، ۱۲,۳ ثانیه می باشد که حدود ۰,۴ ثانیه از مقدار اعلام شده توسط شرکت سازنده (مرجع [۹]) بیشتر است. زمان رسیدن سرعت خودرو سمند دورگه الکتریکی - پیل سوختی از صفر تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، ۱۰,۳ ثانیه است که نسبت به خودرو احتراق داخلی و پیل سوختی خالص به ترتیب حدود ۱۶,۳٪ و ۶۴,۵٪ کاهش یافته است. با توجه به شکل ۹ شتاب بیشینه خودرو پیل سوختی خالص ۱,۷ متر بر ثانیه می باشد که با استفاده از سامانه دورگه حدود ۲,۵ برابر شده و به ۴,۲ متر بر ثانیه افزایش می یابد، اما نسبت به خودرو احتراق داخلی حدود ۲,۳۶٪ کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین اختلاف در سرعت بیشینه دو خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی و احتراق داخلی می باشد. سرعت بیشینه خودرو سمند احتراق داخلی ۱۸۵ کیلومتر بر ثانیه می باشد [۹] که این مقدار در شبیه سازی حدود ۱۹۰,۲ کیلومتر بر ثانیه به دست آمده است. سرعت بیشینه خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی ۱۳۲,۴ کیلومتر بر ساعت می باشد که نسبت به خودرو احتراق داخلی حدود ۳۰,۴٪ کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱۱ مسافت پیموده شده توسط خودرو سمند دورگه الکتریکی - پیل سوختی در ۵ ثانیه ۴۹,۲ متر می باشد که حدود ۸,۱٪ نسبت به نمونه احتراق داخلی افزایش یافته است. با توجه به شکل ۱۲ زمان پیمودن یک کیلومتر توسط خودرو احتراق داخلی نسبت به خودرو دورگه حدود ۰,۱ ثانیه کمتر است. بهبود عملکرد خودرو احتراق داخلی نزدیک شدن دور موتور احتراق داخلی به مقدار بهینه می باشد. با توجه به شکل ۱۳ خودرو سمند احتراق داخلی می تواند تا شیب حدود ۱۹,۵٪ سرعت خود را در ۸۰,۵ کیلومتر بر ساعت برای مدت ۶۰ ثانیه حفظ نماید. که این مقدار برای خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی ۲۱,۳٪ می باشد.



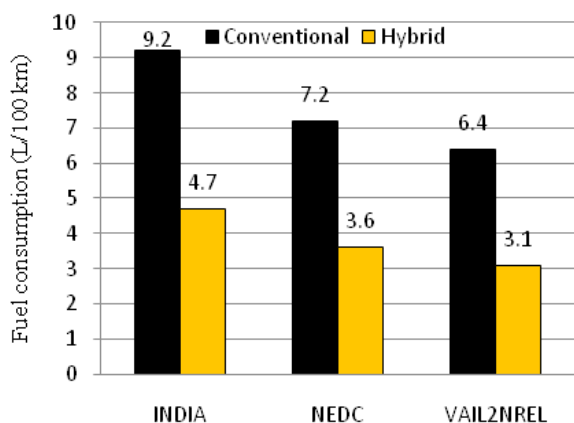
شکل ۱۳ مقایسه قابلیت شیب‌پیمایی خودروهای احتراق داخلی، پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی



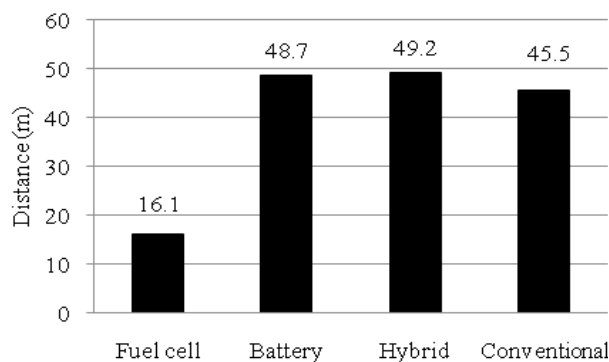
شکل ۱۰ مقایسه سرعت بیشینه خودرو احتراق داخلی با پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی

۷- مصرف سوخت

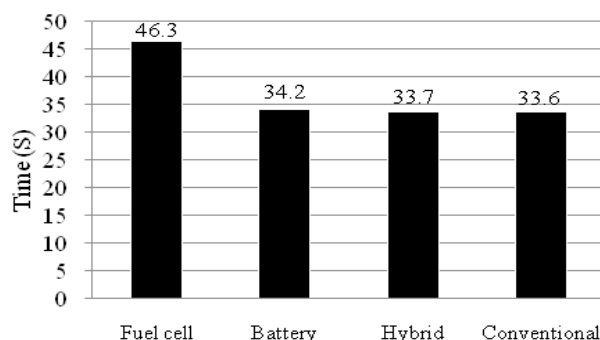
برای مقایسه مصرف سوخت خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی با خودرو احتراق داخلی معادل بنزین سوخت هیدروژن محاسبه شده است. معادل بنزین بر اساس ارزش گرمایی پایین بنزین، ۴۲.۶ (KJ/g) و چگالی بنزین، ۷۴۹ (g/l) محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۱۴ مصرف سوخت خودرو دورگه در مقایسه با خودرو احتراق داخلی در چرخه‌های حرکت مورد استفاده حدود ۴۸ تا ۵۲ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۴ مقایسه مصرف سوخت خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی و احتراق داخلی



شکل ۱۱ مقایسه مسافت پیموده شده در مدت ۵ ثانیه توسط خودروهای احتراق داخلی، پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی



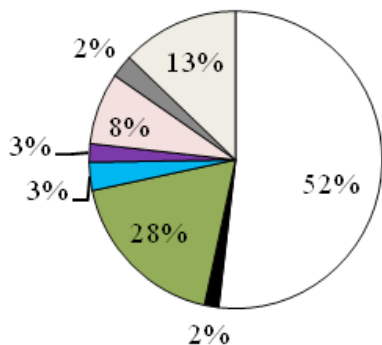
شکل ۱۲ مقایسه زمان پیمودن یک کیلومتر توسط خودروهای احتراق داخلی، پیل سوختی، الکتریکی و دورگه الکتریکی - پیل سوختی

۸- تلفات انرژی و بازده اجزاء

بازده انرژی اجزاء در یک چرخه حرکت با تقسیم انرژی خروجی به انرژی ورودی محاسبه می‌شود [۱۵].

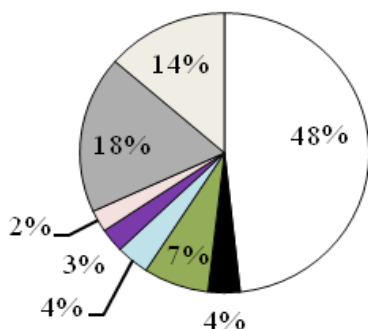
$$\eta = \frac{\text{Output Energy}}{\text{Input Energy}} \quad (2)$$

■ Fuel Cell System ■ Energy Storage
 ■ Motor/controller ■ Gearbox
 ■ Wheel/Axel ■ Aux loads
 ■ Aero ■ Rolling



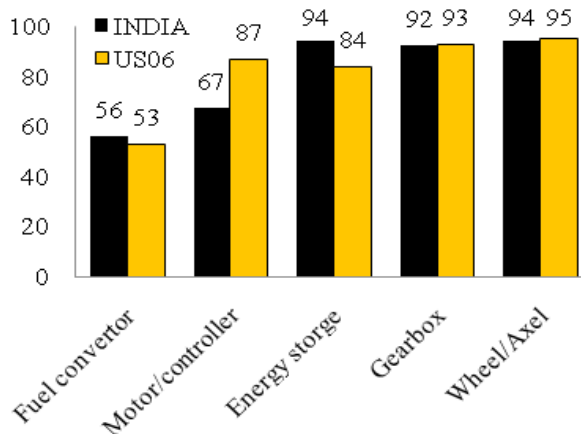
الف

■ Fuel Cell System ■ Energy Storage
 ■ Motor/controller ■ Gearbox
 ■ Wheel/Axel ■ Aux loads
 ■ Aero ■ Rolling



ب

شکل ۱۵ تلفات انرژی سامانه خودرو دورگه در چرخه حرکت (الف - India Urban و ب - US06)



شکل ۱۶ - بازده انرژی اجزاء مختلف خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی در چرخه‌های حرکت مختلف

تلفات انرژی در اجزاء مختلف خودرو با توجه به خصوصیات چرخه حرکت مورد استفاده متفاوت می‌باشد. در شکل ۱۵ سهم اجزاء مختلف خودرو دورگه الکتریکی - پیل سوختی از کل تلفات انرژی در چرخه حرکت شهری India Urban و چرخه حرکت US06 که یک چرخه حرکت با سرعت و شتاب بالا می‌باشد، نشان داده شده است. با توجه به شکل حدود نیمی از کل تلفات در این دو چرخه حرکت مربوط سیستم پیل سوختی می‌باشد. سامانه پیل سوختی به علت تلفات ولتاژ در اثر واکنش الکتروشیمیایی، تلفات ناشی از توان پارازیتی اجزاء جانبی سامانه مانند تلمبه و تنجار و گرمای تولید شده در اثر واکنش الکتروشیمیایی درون استک و کارکرد اجزاء سامانه دارای بیشترین تلفات و در نتیجه کمترین بازده انرژی است. درجه دینورویی بین سامانه پیل سوختی و باتری به صورتی است که توان متوسط توسط سامانه پیل سوختی و توان بیشینه توسط باتری تأمین شود و هنگامی که توان درخواستی از توان متوسط کمتر باشد، باتری پر می‌شود. در چرخه حرکت بین شهری US06 به علت سرعت و شتاب بالا، توان بیشتری از سامانه دورگه درخواست می‌شود که بخشی از آن توسط باتری تأمین می‌گردد. بنابراین در چرخه حرکت US06 توان بیشتری از باتری گرفته می‌شود که این سبب کاهش حالت پر شدن باتری می‌گردد و چون در حالت‌های پر شدن کم مقاومت باتری در برابر خالی شدن افزایش می‌یابد (شکل ۵)، تلفات انرژی افزایش یافته و همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بازده انرژی باتری به ۸۴٪ کاهش می‌یابد. اما برای چرخه‌های حرکت شهری که دارای سرعت کمی می‌باشند، رویکرد پایش طوری طراحی شده است که بیشتر توان مورد نیاز از سامانه پیل سوختی تأمین شود و باتری سهم کمتری در تأمین توان داشته باشد. بنابراین تلفات انرژی باتری در چرخه حرکت India Urban کمتر و در نتیجه بازده انرژی باتری بیشتر می‌باشد. تلفات آیرودینامیکی به سرعت متوسط خودرو بستگی دارد. بر این اساس، سرعت متوسط چرخه حرکت US06 حدود ۳،۳ برابر چرخه حرکت India Urban است. با توجه به شکل ۱۵ سهم تلفات آیرودینامیکی در این چرخه حرکت ۱۸٪ می‌باشد، که ۹ برابر چرخه حرکت India Urban است.

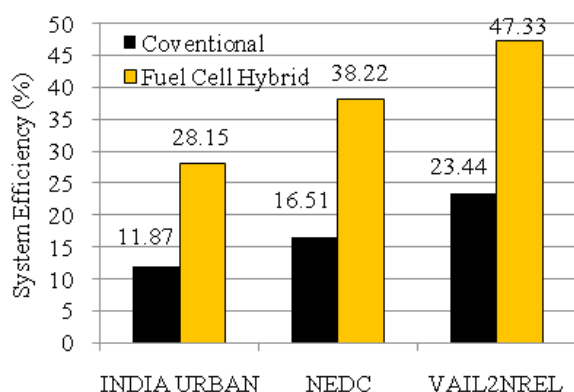
1- Parasitic Power

۹- بازده سامانه

بازده سامانه هیبرید برای هر چرخه حرکت با تقسیم مقدار کل انرژی مورد نیاز چرخه‌ها بر انرژی کل مورد نیاز در ورودی پیل سوختی، محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\eta_{System} = \frac{Wheel\ Energy}{FuelCell\ Input\ Energy} \quad (3)$$

با توجه به شکل ۱۸ بازده سامانه دورگه پیل سوختی نسبت به موتور احتراق داخلی در چرخه‌های حرکت مورد استفاده حدود ۱۰۲ تا ۱۴۷ درصد افزایش یافته است. در چرخه حرکت India Urban (که دارای سرعت کم و تعداد توقف بیشتر می‌باشد) به دلیل اینکه موتور احتراق داخلی به دور مناسب نمی‌رسد، بیشترین اختلاف بازده بین سامانه دورگه الکتریکی- پیل سوختی و موتور احتراق داخلی مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت، دور موتور احتراق داخلی به محدوده مناسب می‌رسد و بازده افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸ مقایسه بازده سامانه دورگه الکتریکی- پیل سوختی و موتور احتراق داخلی

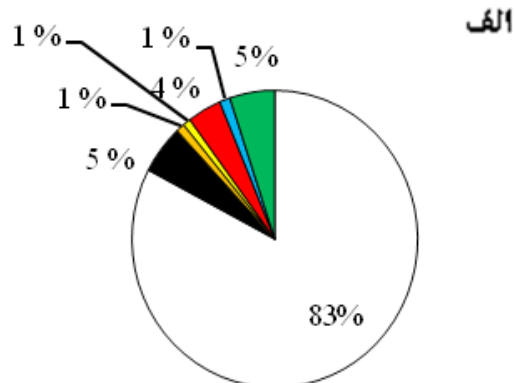
۱۰- بازده خودرو

بازده خودرو دورگه با تقسیم انرژی مکانیکی تولیدشده بر انرژی ورودی به دست می‌آید [۱۷].

$$\eta_{Vehicle} = \frac{(Aero + Rolling)_{Loss}}{Fuel_{in} - Energy_{Battery}} \quad (4)$$

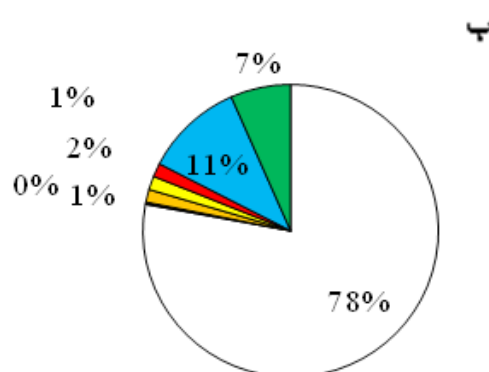
بازده خودرو به دلیل تلفات آیرودینامیک و چرخه‌ها از بازده سامانه (موتور) کمتر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ بازده خودرو دورگه الکتریکی- پیل سوختی نسبت به خودرو احتراق داخلی با توجه به چرخه‌های حرکت مورد استفاده حدود ۹۳ تا ۱۳۵ درصد افزایش می‌یابد.

Engine Clutch Gearbox
wheel/Axel Aux loads Aero
Rolling



الف

Engine Clutch Gearbox
wheel/Axel Aux loads Aero
Rolling

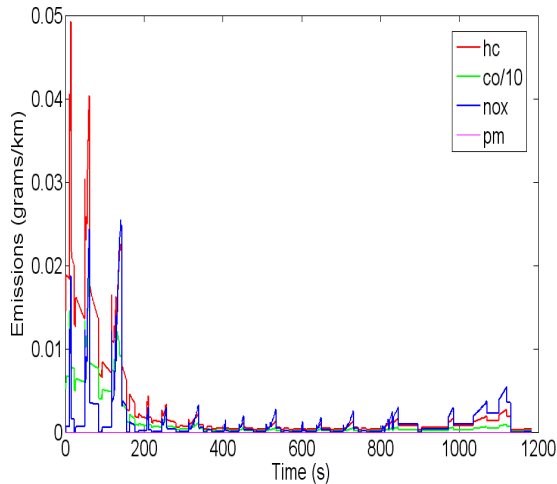


ب

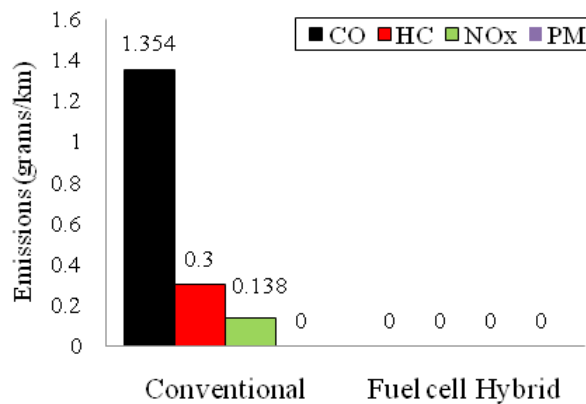
شکل ۱۷ تلفات انرژی سامانه خودرو احتراق داخلی در چرخه حرکت (الف- India Urban و ب- US06)

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود تلفات انرژی موتور در خودرو احتراق داخلی در چرخه‌های حرکت India U-ban و US06 به ترتیب ۸۳٪ و ۷۸٪ از کل تلفات انرژی می‌باشد، که با توجه به شکل ۱۵ این تلفات در سامانه پیل سوختی حدود ۳۷,۳٪ و ۳۸,۴٪ کاهش یافته است. موتور احتراق داخلی به علت بازگشت‌ناپذیری فرایند احتراق بنزین، محدودیت بازده کارنو، وجود قطعات متحرک و تولید آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌ها و مونوکسید کربن که علاوه بر آلاینده بودن به عنوان اتلاف انرژی شیمیایی نیز مطرح می‌شوند، دارای تلفات انرژی بیشتری نسبت به سامانه پیل سوختی می‌باشد.

مونوکسیدکربن روند تقریباً یکنواختی دارد و تأثیر افزایش دما بر مقدار تولید آن نسبت به دیگر آلاینده‌ها کمتر می‌باشد. میزان ذرات ریز معلق در موتورهای دیزلی قابل اهمیت بوده و در موتورهای بنزینی بسیار ناچیز و در حد صفر می‌باشند.

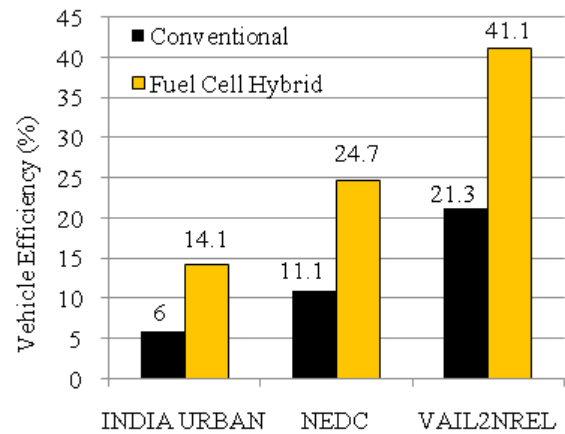


شکل ۲۰ میزان آلاینده‌ها در چرخه حرکت NEDC



شکل ۲۱ مقایسه آلاینده‌های خودرو احتراق داخلی و دورگه الکتریکی- پیل سوختی در چرخه حرکت NEDC

در شکل ۲۱ میزان آلاینده‌های خودرو دورگه الکتریکی- پیل سوختی با نمونه احتراق داخلی خود مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان آلاینده‌های خودرو دورگه الکتریکی- پیل سوختی صفر می‌باشد و نتیجه واکنش سوخت هیدروژن با هوا، آب و گرما است.



شکل ۱۹ مقایسه بازده خودرو دورگه الکتریکی-پیل سوختی و خودرو احتراق داخلی

۱۱- آلاینده‌ها

آلاینده‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل هیدروکربن (HC)، مونوکسیدکربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و ذرات جامد معلق می‌باشند. حدود ۴۰٪ هیدروکربن‌ها، بنزین نسوخته و ۶۰٪ دیگر اجزائی هستند که به صورت ناقص واکنش داده‌اند و در سوخت اصلی موجود نیستند. کارکرد موتور با نسبت سوخت غنی سبب تولید مونوکسیدکربن می‌شود. در این حالت اکسیژن کافی برای تبدیل تمام کربن به دی اکسید کربن (CO₂) وجود ندارد و در نتیجه مقداری از سوخت نمی‌سوزد و مقداری کربن به صورت مونوکسیدکربن باقی می‌ماند. اکسیدهای نیتروژن عمدتاً از نیتروژن موجود در هوا تولید می‌شود و یکی از علل اصلی مه‌دود فتوشیمیایی است که یکی از مشکلات عمده شهرهای بزرگ می‌باشد. به دلیل آبی نبودن واکنش‌های شیمیایی، تولید اکسید نیتروژن علاوه بر دما، به فشار، نسبت هوا به سوخت و زمان احتراق در داخل استوانه بستگی دارد. ذرات جامد بطور عمده در موتورهای CI^۱ تولید می‌شوند و به صورت دوده در گازهای خروجی دیده می‌شوند [۱۸]. همانطور که از شکل ۲۰ مشاهده می‌شود در شروع حرکت و زمان راه‌اندازی (هنگامی که موتور با مخلوط غنی کار می‌کند و دمای دیواره محفظه احتراق نیز به میزان مناسب نرسیده است) میزان آلاینده‌ها و به خصوص هیدروکربن زیاد است. با گذشت زمان و افزایش دمای دیواره محفظه احتراق از میزان آلاینده‌ها کم می‌شود، با این تفاوت که به علت افزایش دما مقدار اکسید نیتروژن بر خلاف ابتدای حرکت از هیدروکربن‌های نسوخته بیشتر می‌باشد. تولید

1- Compression Ignition

۱۲- نتیجه گیری

در این پژوهش یک خودرو سمند الیکس بنزینی با استفاده از امکانات نرم‌افزار ADVISOR به یک خودرو سمند دورگه الکتریکی-پیل سوختی تبدیل شده است. برای خودرو فوق‌الگوی بدنه و چرخ‌ها با در نظر گرفتن کلیه فراسنج‌های مربوط به آن‌ها به نرم‌افزار اضافه شده است. در ادامه عملکرد خودرو شامل آزمون شتاب، سرعت و شیب‌پیمایی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تلفات انرژی اجزاء سامانه، مصرف سوخت و بازده خودرو و سامانه دورگه در چرخه‌های حرکت مختلف در حالت راه‌اندازی سرد مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از الگوسازی خودرو سمند احتراق داخلی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، حدود نیمی از کل تلفات انرژی مربوط به سامانه پیل سوختی است. با توجه به چرخه‌های حرکت مورد استفاده مصرف سوخت خودرو دورگه الکتریکی-پیل سوختی حدود ۴۸ تا ۵۲ درصد نسبت به نمونه احتراق داخلی کاهش یافته است. همچنین بازده خودرو و بازده سامانه در خودرو دورگه نسبت به خودرو احتراق داخلی به ترتیب حدود ۹۳٪ تا ۱۳۵٪ و ۱۰۲٪ تا ۱۴۷٪ افزایش یافته است. بیشترین بازده سامانه پیل سوختی در چرخه‌های حرکت فوق حدود ۴۷٪ می‌باشد.

نتایج آزمون شتاب و شیب‌پیمایی نشان می‌دهد که خودرو دورگه الکتریکی-پیل سوختی به علت استفاده هم‌زمان از بیشترین بازده انرژی پیل سوختی و نیز توان بالای موجود در باتری دارای عملکرد بهتری نسبت به خودروهای پیل سوختی و الکتریکی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که خودرو دورگه الکتریکی-پیل سوختی علاوه بر کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده و آلایندگی صفر از نظر آزمون‌های عملکردی سرعت، شتاب و شیب قابل رقابت با نمونه احتراق داخلی خود می‌باشد.

References:

- [1] Hydrogen and Fuel Cell Bulletin, Vol. 1-5, No. 1- 44, 2006 -2010
- [2] C. Spiegel, PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab, Elsevier Inc, 2008
- [3] Q. Caia, D.J.L. Bretta, D. Browningb, N.P. Brandona, A sizing-design methodology for hybrid fuel cell power systems and its application to an unmanned underwater vehicle, Journal of Power Sources, Vol. 195, pp. 6559-6569, 2010
- [4] P. Atwood, S. Gurski, D.G. Nelson, Degree of hybridization modeling of a hydrogen fuel cell PNGV-class vehicle, SAE International, Paper No. 2002-01-1945, 2002
- [5] D. Wu, Fuel cell hybrid electric vehicle powertrain system design and control, MSc Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, Canada, 2008
- [6] P. Rodatz, O. Garcia, L. Guzzella, Performance and operational characteristics of a hybrid vehicle powered by fuel cells and supercapacitors, SAE International, Paper No. 2003-01-0418, 2003
- [7] S. Gurski, H. Lohse-Busch, G. Henshaw, D.J. Nelson, Design of a zero emission sport utility vehicle for future truck 2002, SAE International, Paper No. 2003-01-1264, 2003
- [8] N. Qian, x. Dong-ji, H. Hua, CH. Pin, K.Y. Bae, Modeling and control strategy development for fuel cell hybrid vehicle, International Workshop on Information Security and Application, Qingdao, China, Novemer 21-22, 2009
- [9] Samand LX Vehicle Manual, Irankhodro Company, 2010
- [10] M. Ehsani, Y.Gao, S.E. Gay, A. Emadi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, fundamentals, theory, and design, International Standard Book, No. 0-8493-3154-4, 2005
- [11] V.H. Johnson, Battery performance models in ADVISOR, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 321-329, 2002
- [12] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik, K. Wipke, ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 225-266, 2002
- [13] D.W. Gao, C.H. Mi, A. Emadi, Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles, IEEE, Vol. 95, pp. 729-745, 2007
- [14] ADVISOR Help, 2002
- [15] I. Husain, Electric and hybrid vehicle design fundamental, Newyork CRC Press, 2003
- [16] M.J. Ogburn, D.J. Nelson, W. Luttrell, B. King and S. Postle, Systems integration, modeling and validation of a fuel cell hybrid electric vehicle, SAE International, Paper No. 2000-01-0376, 2000
- [17] S. Williamson, Efficiency modeling and analysis of power electronic conwenrters and electric motor drives for parallel hybrid electric and fuel cell vehicles, PhD Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Chicago University, 2006
- [18] J.B. Heywood, Internal combustion engine fundametas, New york McGraw-Hill Inc, 1988

Performance Evaluation of a Samand Vehicle with Internal Combustion Engine System and Hybrid Electric-Fuel Cell System

A.M. Yeganeh Moghadam*

MSc., Tarbiat Modarres University
aliyeganehmoghadam@yahoo.com

M.R. Malekbala

MSc., Tarbiat Modarres University
s.alizadehnia@ip-co.com

F. Ommi

Associated Professor, Tarbiat Modares University
fommi@modares.ac.ir

S. Javan

MSc., Tarbiat Modares University
s.javan@modares.ac.ir

P. Kazempoor

PhD., Tarbiat Modares University
pejmankazempoor@gmail.com

*Corresponding Authors

Received: Aug. 21, 2012
Accepted in Revised Form: Feb. 11, 2013

Abstract

In this research, the conventional internal combustion engine system in a samand vehicle is replaced by a hybrid electric-fuel cell system. The samand vehicle is then modeled in the ADVISOR software, considering both systems. For modeling, the body structure and wheels models as well as their corresponding parameters are added to the software. For both cases, simulation results such as the fuel consumption and the system efficiency in various driving cycles are studied and compared together. Results show that in the hybrid electric-fuel cell vehicle beside the reduction of the fuel consumption, the efficiency increases with zero exhaust emission pollutant gases. Also, the vehicle could challenge with the internal combustion vehicle in issues such as performance parameters, the velocity, the acceleration and the gradeability.

Keywords: *samand vehicle, hybrid electric-fuel cell system, internal combustion engine, fuel consumption, efficiency*