

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : قدرت

طراحی بهینه اندازه منابع تولید توان در خودروی برقی پیل سوختی متصل به شبکه

دانشجو:

سید رضا عزیزی قلعه‌سری

استاد راهنما:

دکتر امین حاجی‌زاده

استاد مشاور:

دکتر مرتضی رحیمیان

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۳۴۴/آ.ت.ب
تاریخ: ۹۳/۱۰/۲۲
ویرایش: -----

فرم صورت جلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:
رضا عزیزی قلعه سری رشته: برق گرایش: قدرت (ماشینهای الکتریکی)
تحت عنوان: طراحی بهینه اندازه منابع تولید توان در خودروی برقی پیل سوختی متصل به شبکه
که در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: ب) امتیاز (۱۷/۹۹) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	امیرحسین ابراهیم	استاد	
۲- استاد مشاور	مرتضی رحیمیان	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	توری بازراد	دانشیار	
۴- استاد ممتحن	مهدیه الفی	استاد	
۵- استاد ممتحن	حسن اصغری	استاد	

رئیس دانشکده:

تقدیم

به پدر بزرگوار و مادر مهربانم، به آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که امروز در آن ایستاده‌ام

برسم.

تقدیر و تشکر:

تشکر و سپاس بی‌پایان مخصوص خدایی است که بشر را آفریده و به او قدرت اندیشیدن داده و توانایی‌های بالقوه را در وجود انسان قرار داده و او را امر به تلاش و کوشش نموده و راهنمایی را برای هدایت بشر فرستاده است .

پس از ارادت خاضعانه به درگاه خداوند بی‌همتا لازم است از استاد ارجمند و گرانقدر جناب آقای دکتر امین حاجی‌زاده به خاطر سعه‌ی صدر و رهنمودهای دلسوزانه که در تهیه‌ی این تحقیق مرا مورد لطف خود قرار دادند و راهنمایی‌های لازم را نمودند، صمیمانه سپاسگذاری می‌کنم. همچنین از استاد فرزانه و دلسوز جناب آقای دکتر رحیمیان که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این کار به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ همچنین بر خود لازم می‌دانم که از تمامی اساتیدی که در طول دوران تحصیل و یادگیری علم از محضر آن‌ها بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی کنم و موفقیت همگان را از درگاه احدیت خواهانم.

تعهد نامه

اینجانب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته دانشکده
..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه
..... تحت راهنمایی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده :

در این پایان نامه دو روش بهینه‌سازی برای یک خودرو هایبرید پیل سوختی / باتری با قابلیت اتصال به شبکه معرفی می‌شود. در ابتدا به معرفی یک مدل تئوری برای توصیف ارتباط بین پارامترهای انتقال توان و عملکرد خودرو می‌پردازیم. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در شرایط کار معمولی موتور الکتریکی، حداکثر سرعت و مسافت طی شونده توسط خودرو به صورت خطی تحت تأثیر پارامترهایی مثل راندمان پیل، توان خروجی پیل، جرم هیدروژن ذخیره‌شده مخزن، توان جانبی، ظرفیت باتری و مقاومت متوسط باتری قرار می‌گیرند. علاوه بر این زمان شتاب نیز به صورت خطی به پارامترهای ذکر شده به غیر از پارامترهای مرتبط با باتری بستگی دارد. در ادامه با طرح یک مسئله بهینه‌سازی سعی در کمینه کردن هزینه کلی سیستم خودرو می‌نماییم که این هزینه شامل هزینه ثابت (هزینه خرید باتری و پیل سوختی) و هزینه نگهداری و عملکرد خودرو (هزینه هیدروژن مصرفی و الکتریسیته دریافتی از شبکه) می‌باشد. در ادامه با در نظر گرفتن یک سری قیود سعی در حداقل کردن هزینه ثابت و نگهداری خودرو می‌نماییم. با حل مسئله بهینه‌سازی و به دست آوردن مقادیر بهینه سپس برای تایید درستی عملکرد خودرو با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR صحت و درستی نتایج را نشان می‌دهیم. در پایان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با استفاده از قابلیت نرم‌افزار ADVISOR اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی در دو سیکل حرکتی استاندارد می‌نماییم.

کلمات کلیدی: خودروی برقی، پیل سوختی، باتری، خودروی هایبرید پیل سوختی، متصل به شبکه،

بهینه‌سازی، تابع هزینه

لیست مقالات استخراجی از پایان نامه:

عزیزی قلعه‌سری، سید رضا و امین حاجی‌زاده، ۱۳۹۳، تعیین اندازه بهینه منابع تغذیه خودرو هایبرید پیل سوختی متصل به شبکه، بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.

فصل اول : مقدمه

۱-۱- پیشگفتار	۲
۱-۱-۱- آلودگی هوا	۲
۱-۱-۲- تغییرات جهانی آب و هوا	۴
۱-۱-۳- سیستم انرژی و هزینه هیدروژن	۵
۱-۲- پیل سوختی هیدروژنی	۶
۱-۲-۱- تاریخچه پیل سوختی	۹
۱-۲-۲- مزایا و معایب	۱۰
۱-۲-۲-۱- مزایای پیل سوختی:	۱۰
۱-۲-۲-۲- معایب پیل سوختی:	۱۱
۱-۳- خودروهای الکتریکی	۱۲
۱-۴- خودروهای پیل سوختی	۱۳
۱-۴-۱- خودروهای پیل سوختی (ساده)	۱۳
۱-۴-۲- خودروهای پیل سوختی ترکیبی (هایبریدی)	۱۴
۱-۴-۳- انواع پیل های سوختی مورد استفاده در صنعت خودرو	۱۵
۱-۴-۳-۱- پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد:	۱۵
۱-۴-۳-۲- پیل سوختی متانول مستقیم:	۱۵
۱-۴-۴- اهداف پایان نامه	۱۶

۱-۴-۵- ساختار پایان نامه ۱۶

فصل دوم: معرفی انواع ساختار خودروی برقی و پیل سوختی

۱-۲- مقدمه ۲۰

۲-۲- خودروهای احتراق داخلی ICE ۲۰

۳-۲- خودروهای الکتریکی باتری دار ۲۲

۴-۲- خودروهای الکتریکی هایبرید سری ۲۳

۵-۲- خودروی الکتریکی هایبرید موازی ۲۵

۶-۲- خودروی هایبرید سری- موازی ۲۶

۷-۲- خودروی هایبرید مختلط ۲۶

۸-۲- خودروی هایبرید با قابلیت اتصال به شبکه ۲۷

۹-۲- خودروی پیل سوختی ۲۸

۱۰-۲- خودروی هایبرید پیل سوختی متصل به شبکه ۳۰

۱۱-۲- مروری بر پژوهشهای قبلی در زمینه طراحی خودروهای پیل سوختی ۳۰

فصل سوم: مدل سازی ریاضی خودروی برقی پیل سوختی و معرفی تابع هدف

۱-۳- مدل تئوری خودرو ۳۴

۱-۱-۳- ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی ۳۴

۲-۳- ارتباط بین عملکرد خودرو و پارامترهای انتقال توان ۳۵

۱-۲-۳- حداکثر سرعت (v_{max}) ۳۶

۲-۲-۳- زمان شتاب (t_u) ۳۷

۳۸ ۳-۲-۳- حداکثر شیب بالارونده (α_{max})

۳۹ ۴-۲-۳- استراتژی مدیریت انرژی

۴۰ ۵-۲-۳- حداکثر مسافت طی شونده تحت سرعت ثابت (L)

۴۱ ۶-۲-۳- هیدروژن مصرفی

۴۲ ۳-۳- تعریف مسئله

فصل چهارم : بررسی عملکرد خودرو هایبرید پیل سوختی متصل به شبکه و بهینه-

سازی منابع تغذیه

۴۶ ۱-۴- تأثیر پارامترهای انتقال توان بر روی عملکرد خودرو

۴۷ ۱-۱-۴- تأثیر پارامترهای مربوط به پیل سوختی (m_{hydro} و P_{fc-max} ، η_{fc})

۴۸ ۲-۱-۴- پارامترهای مربوط به باتری (R_{bat} و C_{bat})

۵۱ ۳-۱-۴- توان جانبی

۵۳ ۲-۴- حل مساله بهینه‌سازی به روش مستقیم

۵۳ ۱-۲-۴- حداکثر سرعت

۵۵ ۲-۲-۴- زمان شتاب

۵۶ ۳-۲-۴- مسافت طی شونده

۵۷ ۴-۲-۴- بازنویسی قیود مسئله

۶۰ ۳-۴- صحت‌گذاری نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR

۶۰ ۱-۳-۴- معرفی نرم‌افزار ADVISOR

۶۱ ۲-۳-۴- شبیه‌سازی در سیکل رانندگی UDDS

۳-۳-۴- شبیه‌سازی در سیکل رانندگی NEDC ۶۴

فصل پنجم : حل مساله بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR

۱-۵- مقدمه ۶۸

۱-۱-۵- الگوریتم ژنتیک ۶۸

۲-۵- روش حل ۷۰

۱-۲-۵- تابع هدف ۷۳

۲-۲-۵- نتایج به‌دست‌آمده در دو سیکل متفاوت ۷۵

فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶- نتیجه‌گیری ۷۸

۲-۶- پیشنهادات ۸۰

فهرست مراجع ۸۱

فهرست جداول

شماره صفحه

جدول (۱-۳) مقادیر ضرایب k_3 و k_4 طی پنج سال گذشته.....	۴۴
جدول (۱-۴) پارامترهای خودرو سواری پراید	۴۶
جدول (۲-۴) مشخصات سیکل رانندگی UDDS.....	۶۱
جدول (۳-۴) نتایج تست حداکثر سرعت و زمان شتاب در سیکل NEDC.....	۶۴
جدول (۴-۴) مشخصات سیکل رانندگی NEDC.....	۶۴
جدول (۵-۴) نتایج تست حداکثر سرعت و زمان شتاب در سیکل NEDC.....	۶۶

فصل پنجم

جدول (۱-۵) : قیود موردنظر در مسئله.....	۷۰
جدول (۲-۵) مشخصات کلی خودرو	۷۰
جدول (۳-۵) مشخصات انواع پیل سوختی موجود در ADVISOR.....	۷۰
جدول (۴-۵) مشخصات انواع موتور الکتریکی القایی به همراه کنترلر موجود در ADVISOR.....	۷۱
جدول (۵-۵) مشخصات انواع باتری موجود در ADVISOR.....	۷۲
جدول (۶-۵) حدود متغیرهای مسئله بهینه‌سازی.....	۷۳
جدول (۷-۵) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از ADVISOR.....	۷۵
جدول (۸-۵) پارامترهای الگوریتم ژنتیک	۷۵

شکل (۱-۱) شماتیک کلی پیل سوختی [۳]..... ۶

فصل دوم

شکل (۱-۲) طبقه بندی انواع مختلف خودروها بر اساس اندازه خودرو و مسافت طی شونده [۴]..... ۲۱

شکل (۲-۲) : ساختار خودرو ICE [۶]..... ۲۲

شکل (۳-۲) ساختار BEV..... ۲۳

شکل (۴-۲) ساختار SHEV..... ۲۴

شکل (۵-۲) ساختار خودروی هایبرید موازی..... ۲۵

شکل (۶-۲) ساختار خودروی هایبرید سری- موازی..... ۲۶

شکل (۷-۲) ساختار خودروی هایبرید مختلط..... ۲۷

شکل (۸-۲) ساختار PHEV..... ۲۹

شکل (۹-۲) خودروی هایبرید پیل سوختی..... ۳۰

شکل (۱۰-۲) ساختار خودروی پیل سوختی متصل به شبکه با پیل سوختی RFC..... ۳۱

شکل (۱۱-۲) استفاده از ابر خازن در خودروی پیل سوختی..... ۳۲

شکل (۱۲-۲) (الف) نحوه آرایش پیل سوختی (ب) ساختار و آرایش پیل سوختی..... ۳۲

فصل سوم

شکل (۱-۳) ساختار خودروی برقی پیل سوختی/باتری..... ۳۴

شکل (۲-۳) راندمان موتور برحسب گشتاور و سرعت..... ۳۸

شکل (۳-۳) استراتژی CDCS..... ۴۰

فصل چهارم

شکل (۱-۴) تأثیر پارامترهای پیل سوختی بر روی عملکرد خودرو..... ۴۷

شکل (۲-۴) سیستم باتری خودرو..... ۴۸

شکل (۳-۴) منحنی تغییرات ولتاژ مدارباز و مقاوت باتری برحسب [۲۰]..... ۴۹

- شکل (۴-۴) تأثیر ظرفیت و مقاومت باتری بر حداکثر سرعت و زمان شتاب ۵۱
- شکل (۴-۵) تأثیر ظرفیت و مقاومت باتری بر مسافت طی شونده ۵۲
- شکل (۴-۶) تأثیر توان جانبی بر عملکرد خودرو ۵۳
- شکل (۴-۷) نمودار سه‌بعدی تابع حداکثر سرعت برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری ۵۴
- شکل (۴-۸) نمودار تابع حداکثر سرعت برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری ۵۴
- شکل (۴-۹) نمودار سه‌بعدی تابع زمان شتاب برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری .. ۵۵
- شکل (۴-۱۰) نمودار تابع زمان شتاب برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری ۵۶
- شکل (۴-۱۱) نمودار سه‌بعدی تابع مسافت L برحسب جرم هیدروژن و ظرفیت باتری ۵۷
- شکل (۴-۱۲) نمودار تابع مسافت L برحسب جرم هیدروژن و ظرفیت باتری ۵۷
- شکل (۴-۱۳) تأثیر ظرفیت باتری بر هزینه ثابت و هزینه نگه‌داری خودرو ۵۹
- شکل (۴-۱۴) نمودار سرعت بر حسب مسافت در سیکل UDDS ۶۲
- شکل (۴-۱۵) نمودار سرعت برحسب زمان خودرو طراحی شده در سیکل UDDS ۶۲
- شکل (۴-۱۶) تفاوت سرعت استاندارد سیکل و سرعت خودرو ۶۳
- شکل (۴-۱۷) توان خروجی پیل سوختی در طول سیکل ۶۳
- شکل (۴-۱۸) نمودار سرعت برحسب زمان خودرو طراحی شده در سیکل NEDC ۶۴
- شکل (۴-۱۹) نمودار سرعت برحسب زمان خودرو طراحی شده در سیکل NEDC ۶۵
- شکل (۴-۲۰) تفاوت سرعت استاندارد سیکل و سرعت خودرو ۶۵
- شکل (۴-۲۱) توان خروجی پیل سوختی در طول سیکل NEDC ۶۶

فصل پنجم

شکل (۵-۱) توان خروجی انواع موتور الکتریکی برحسب Power scale ۷۱

شکل (۵-۲) توان خروجی انواع پیل سوختی برحسب پارامتر Power scale ۷۲

شکل (۵-۳) استفاده از ADVISOR در الگوریتم ژنتیک ۷۴

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

در دهه گذشته به سبب افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی شرکت‌های بزرگ خودروسازی بیشتر توجه و تلاش خود را بر روی طراحی خودروهایی با آلایندگی و مصرف سوخت پایین معطوف نموده‌اند [۱]. استفاده از خودروهای الکتریکی^۱ به جهت برآورده نمودن اهداف موردنظر یک گام اساسی در این راستا بوده است؛ اما امروزه علی‌رغم پیشرفت‌های به‌عمل‌آمده در المان‌های الکترونیک قدرت و باتری‌ها، خودروهای الکتریکی با محدودیت‌های بسیاری روبرو بوده و تنها قابلیت استفاده در مسافت‌های محدود و کاربردهای خاص را دارا می‌باشند. به همین جهت تحقیقات و مطالعات پیرامون خودروهای برقی به سمت نوع هایبرید^۲ آن معطوف گردیده است. در این راستا استفاده از پیل سوختی پلیمری^۳ (PEM) به‌عنوان مولد انرژی الکتریکی به سبب چگالی توان و بازده بالا، طول عمر زیاد، آلودگی صوتی کم و عدم وجود قطعات و قسمت‌های متحرک و سازگاری مناسب با محیط‌زیست یک ایده مناسب برای شرکت‌های بزرگی نظیر جنرال موتورز، مرسدس بنز، فورد و ... بوده است. دلایل متعددی برای استفاده از پیل سوختی به‌عنوان منبع تولید توان در خودرو وجود دارد. البته این دلایل تا حد زیادی به نوع نگاه محققین بستگی دارد. با این حال برای راحتی کار این دلایل را به سه گروه آلودگی هوا، سیستم‌های انرژی و تغییرات آب‌وهوای جهانی تقسیم می‌کنیم.

۱-۱-۱- آلودگی هوا

علاقه به خودروهای برقی طی دهه‌های گذشته رشد چشمگیری داشته است. انگیزه اولیه برای توسعه وسایل نقلیه الکتریکی تجاری از زمانی مطرح شد که مردم متوجه مشکلات بهداشتی خود در ارتباط با آلودگی هوای شهری شدند [۲]. آلودگی هوا که حمل‌ونقل به‌عنوان عامل اصلی آن مطرح می‌شود، باعث تمایل بسیاری از دولت‌ها و مسئولین شهری و استانی به‌منظور کاهش این مشکل شده

^۱ Electric vehicles

^۲ Hybrid electric vehicles

^۳ Proton exchange membrane fuel cell

است. با افزایش تراکم و توسعه شهری در سرتاسر جهان، مسئله وخامت کیفیت هوای شهری با توجه به تولید گازهای گلخانه‌ای حاصل از خودروها تبدیل به یک مشکل جهانی شده است. فشار نظارتی بر تولیدکنندگان خودرو منجر به تولید خودروهایی با موتورهای با راندمان بالاتر، اتومبیل‌هایی با وزن سبک‌تر و آیرودینامیک بهتر و به‌کارگیری گسترده از فن‌آوری مبدل کاتالیستی^۴ شده است. علاوه بر این، انگیزه برای تحقیق در مورد امکان‌سنجی تولید خودروهای برقی برای رقابت و حتی جایگزینی خودروهای با موتور احتراق داخلی^۵ مطرح شد.

برای از بین بردن تولید گازهای گلخانه‌ای توسط خودروها چند شرکت تولیدکننده خودرو اقدام به تولید نمونه‌های توسعه‌یافته خودروهای برقی نموده‌اند. اگرچه عملکرد این خودروها در جاده قابل قبول بوده است؛ اما همه‌ی آن‌ها از مشکلات مربوط به ذخیره‌سازی انرژی و مدت‌زمان شارژ طولانی رنج می‌بردند. در طرح اولیه از باتری سرب اسیدی^۶ و نیکل کادمیومی^۷ برای ذخیره انرژی استفاده شده بود، اما با این حال این باتری‌ها دارای ظرفیت محدود در مقایسه با مقدار انرژی ذخیره‌شده در یک خودرو معمولی با سوخت بنزین بوده‌اند. علاوه‌براین زمان لازم برای شارژ مجدد باتری‌ها به‌طور چشمگیری طولانی بوده است، درحالی‌که در خودروهای معمولی طی چند دقیقه مخزن بنزین پر می‌شود.

توانایی پیل سوختی برای حل این مشکل و تأمین برق بدون تولید گازهای گلخانه‌ای مضر، منجر به ایجاد علاقه برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان منبع تولید توان در خودروها شده است. شرکت‌های خودروسازی بر این باورند با پیشرفت در زمینه پیل سوختی قادر به تولید خودروهایی بدون آلودگی و محدودیت‌های گفته‌شده، نظیر مدت‌زمان شارژ طولانی و برد مسافت کوتاه می‌باشند.

^۴ Catalytic converter

^۵ Internal combustion engine

^۶ Lead-acid

^۷ Nickel-cadmium

۱-۱-۲- تغییرات جهانی آب و هوا

علاوه بر مشکل محلی مربوط به آلودگی هوا، گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی ناشی از فعالیت‌های بشر یکی از مشکلات عمده زیست‌محیطی است که در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محافل علمی و سیاسی جهان را به خود جلب کرده است. معمولاً دگرگونی و تغییر در اقلیم، پدیده‌ای طبیعی است که در مقیاس زمانی چند هزارساله رخ می‌دهد اما تغییرات اقلیمی که اخیراً به وقوع پیوسته، در مقایسه با تغییرات اقلیمی دو میلیون سال پیش بسیار شدیدتر بوده است و زمین در طول دو دهه گذشته به اوج گرمای خود در دو هزار سال اخیر رسیده است. در حال حاضر زمین ۰.۶ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر از سال ۱۹۰۰ میلادی است. بسیاری از دانشمندان نسبت به گرمایش روزافزون زمین هشدار داده و برخی از آنان معتقدند که تنها یک دهه برای مقابله با این مشکل فرصت هست و پس از گذشت این مدت نجات کره زمین امکان‌پذیر نخواهد بود، زیرا حتی افزایش یک‌درجه‌ای دمای کره زمین سبب تغییرات فراوانی در آب‌وهوای کره زمین و شرایط زندگی موجودات زنده آن خواهد شد. دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیترو^۸، پرفلوئوروکربن‌ها^۹، هیدروفلوئوروکربن‌ها^{۱۰} و سولفور هگزا فلوراید^{۱۱} از گازهای گلخانه‌ای مهم هستند. مطالعات فراوانی بر روی تأثیر تولید گازهای گلخانه‌ای بر روی تغییرات آب‌وهوای جهانی انجام شده است. بخش حمل‌ونقل با تولید ۴۰ تا ۵۰ درصدی از گاز دی‌اکسید کربن موجود در هوا به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع این آلودگی محسوب می‌شود. اگرچه در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در وسایل نقلیه احتراق داخلی پیشرفت‌هایی در زمینه بهبود موتور و هایبرید کردن آن وجود داشته است، اما در بهترین حالت نیز تولید گازهای گلخانه‌ای به نصف کاهش یافته است. برای رسیدن به یک کاهش اساسی در تولید گازهای گلخانه‌ای استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی به‌عنوان یک رویکرد امیدوارکننده خواهد بود. وسایل نقلیه الکتریکی با استفاده از

^۸ N₂O

^۹ PFC

^{۱۰} HFC

^{۱۱} SF₆

باتری‌ها شرط رسیدن به یک وسیله نقلیه بدون آلودگی را برآورده می‌سازند، اما از آنجایی که عملکرد باتری‌ها بر اساس مقدار انرژی ذخیره‌شده هست در نتیجه عملکرد محدودی دارند. استفاده از پیل سوختی هیدروژنی به دلیل نداشتن هیچ‌گونه آلودگی و راندمان بیش از سه برابری نسبت به موتورهای احتراق داخلی ایده بسیار مناسبی برای رسیدن به تولید خودروهای بدون آلاینده‌گی و با عملکرد مناسب می‌باشد.

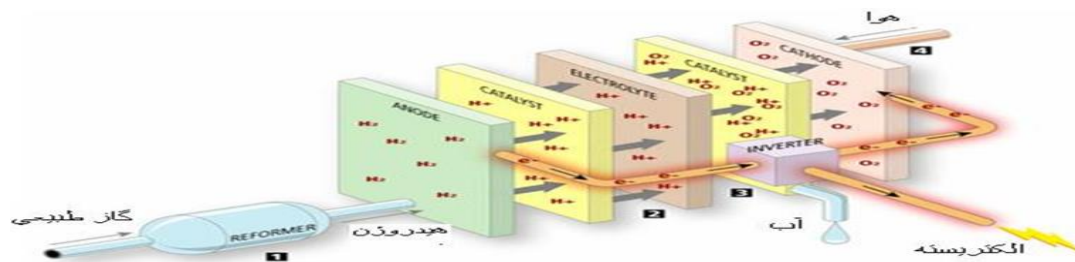
۱-۱-۳- سیستم انرژی و هزینه هیدروژن

مجموعه‌ای از عوامل مختلف از جمله محدودیت منابع فسیلی، تأثیرات منفی زیست‌محیطی، بهره‌گیری از منابع هیدروکربنی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، منازعات سیاسی و تأثیرات آن بر روی ارائه انرژی پایدار از جمله دلایلی هستند که بسیاری از سیاستمداران و متخصصین مباحث انرژی و محیط‌زیست را در حرکت به سوی ایجاد ساختاری نوین مبتنی بر امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط‌زیست، ارتقاء کارایی سیستم انرژی وادار نموده است. بر این اساس هیدروژن یکی از بهترین گزینه‌ها جهت ایفای نقش حامل انرژی در این سیستم جدید انرژی می‌باشد. هیدروژن به‌عنوان فراوان‌ترین عنصر موجود در سطح زمین به روش‌های مختلف قابل تولید می‌باشد. در یک سیستم ایده آل انرژی بر پایه هیدروژن با هدف تأمین امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط‌زیست و ارتقاء کارایی سیستم انرژی، هیدروژن از الکتریسیته تولیدی از منابع تجدید پذیر نظیر باد، خورشید، زمین‌گرایی و نظایر آن تولید شده و پس از ذخیره‌سازی و انتقال به محل‌های مصرف، در کاربردهای مختلف از جمله تجهیزات الکترونیکی کوچک (میلی وات)، صنعت حمل‌ونقل و صنایع نیروگاهی قابل به‌کارگیری است. با این رویکرد بسیاری بر این باورند که سوخت نهایی بشر هیدروژن بوده و بشر در آینده‌ای نه‌چندان دور عصر هیدروژن را تجربه خواهد نمود. از جمله ویژگی‌هایی که هیدروژن را از سایر گزینه‌های مطرح سوختی متمایز می‌نماید، می‌توان به فراوانی، انتشار بسیار ناچیز آلاینده‌ها، برگشت‌پذیر بودن چرخه تولید آن و کاهش اثرات گلخانه‌ای اشاره نمود. سیستم انرژی هیدروژنی به دلیل استقلال از منابع

اولیه انرژی، سیستم دائمی، پایدار، فناپذیر، فراگیر و تجدید پذیر می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه‌چندان دور تولید و مصرف آن به‌عنوان حامل انرژی به سراسر اقتصاد جهانی سرایت نموده و اقتصاد هیدروژنی تثبیت شود؛ با این‌وجود نباید انتظار داشت که هیدروژن در بدو ورود از نظر قیمتی بتواند با سایر حامل‌های انرژی رقابت نماید. در آینده هیدروژن و پیل‌های سوختی می‌توانند نقش محوری و کنترل‌کنندگی در آلودگی شهرها داشته باشند. عمل تبدیل انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن به انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی انجام می‌پذیرد که متناسب با کاربرد و خواص ساختاری آن‌ها، پیل‌های سوختی خود به انواع مختلف تقسیم می‌شوند. در واقع اهمیت فناوری پیل سوختی در یک سیستم انرژی بر پایه هیدروژن (عصر هیدروژن) به‌گونه‌ای است که بسیاری آن را به لوکوموتیو قطار توسعه عصر هیدروژن تشبیه نموده‌اند. علاوه بر فناوری پیل سوختی به عنوان مصرف‌کننده هیدروژن در عصر هیدروژن، فناوری‌های تولید، ذخیره‌سازی، عرضه و انتقال هیدروژن نیز از اجزاء اصلی ساختار انرژی این عصر خواهند بود.

۱-۲- پیل سوختی هیدروژنی

پیل سوختی نوعی پیل الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی حاصل از واکنش را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سازه و بدنه اصلی پیل سوختی از الکتrolیت، الکتروود آند و الکتروود کاتد تشکیل شده است. نمای کلی یک پیل سوختی به همراه گازهای واکنش‌دهنده و تولیدشده و مسیر حرکت یون‌ها در شکل (۱-۱) ارائه شده است.



شکل (۱-۱): شماتیک کلی پیل سوختی [۳]

پیل سوختی یک دستگاه تبدیل انرژی است که به لحاظ نظری تا زمانی که ماده اکسیدکننده و سوخت در الکترودهای آن تأمین شود قابلیت تولید انرژی الکتریکی را دارد. البته در عمل استهلاک، خوردگی و بد عمل کردن اجزای تشکیل دهنده، طول عمر پیل سوختی را کاهش می‌دهد. در یک پیل سوختی، سوخت به‌طور پیوسته به الکتروود آند و اکسیژن به الکتروود کاتد تزریق می‌شود و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکتروودها انجام شده و با ایجاد پتانسیل الکتریکی جریان الکتریکی برقرار می‌گردد. اگرچه پیل سوختی اجزاء و ویژگی‌های مشابه یک باتری را دارد اما از بسیاری جهات با آن متفاوت است. باتری یک وسیله ذخیره انرژی است و بیشترین انرژی قابل استحصال از آن به‌وسیله میزان ماده شیمیایی واکنش‌دهنده که در خود باتری ذخیره شده است (عموماً در الکتروودها) تعیین می‌شود. چنانچه ماده واکنش‌دهنده در باتری کاملاً مصرف شود، تولید انرژی الکتریکی متوقف خواهد شد (باتری تخلیه می‌شود). در باتری‌های نسل دوم ماده واکنش‌دهنده با شارژ مجدد، دوباره احیا می‌شود که این عمل مستلزم تأمین انرژی از یک منبع خارجی است. در این حالت نیز انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری محدود و وابسته به میزان ماده واکنش‌دهنده در آن خواهد بود.

گاز اکسیدکننده نظیر هوا یا اکسیژن خالص در الکتروود کاتد که با صفحه الکتروولیت در تماس است جریان پیدا می‌کند و با اکسیداسیون الکتروشیمیایی سوخت که معمولاً هیدروژن است و با احیاء اکسیدکننده انرژی شیمیایی گازهای واکنش‌گر به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. از نظر تئوری، هر ماده‌ای که به‌صورت شیمیایی قابل اکسید شدن باشد و بتوان آن را به‌صورت پیوسته (به‌صورت سیال) به پیل سوختی تزریق کرد، می‌تواند به‌عنوان سوخت در الکتروود آند پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور مشابه ماده اکسیدکننده سیالی است که بتواند با نرخ مناسبی احیا شود. گاز هیدروژن به دلیل تمایل واکنش دهنده‌گی بالا به همراه چگالی انرژی بالا به‌عنوان سوخت ایده آل در پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هیدروژن را می‌توان از تبدیل هیدروکربن‌ها از طریق واکنش کاتالیستی تولید و به صورت‌های گوناگون ذخیره نمود. اکسیژن موردنیاز در پیل سوختی به‌طور مستقیم از هوا تهیه می‌شود. بر روی سطح الکتروودهای آند و کاتد پیل سوختی واکنش اکسیداسیون و احیاء در

ناحیه سه فاز (و در صورت جامد بودن الکترولیت دوفازی) نزدیک سطح مشترک واکنش دهنده‌ها، کاتالیست و الکترولیت صورت می‌گیرد. این ناحیه سه فاز نقش مهمی در عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی به‌ویژه پیل‌های سوختی با الکترولیت مایع دارد. در این‌گونه پیل‌های سوختی، گازهای واکنش دهنده از میان یک لایه نازک از الکترولیت که سطح الکترودهای متخلخل^{۱۲} را پوشانده است عبور کرده و واکنش الکتروشیمیایی مناسب روی سطح الکترودها مربوطه انجام می‌شود. چنانچه الکترودها متخلخل حاوی مقادیر بیش از حد الکترولیت باشد الکترودها در اصطلاح غرق^{۱۳} شده و به این ترتیب انتقال واکنشگرهای گازی محلول در الکترولیت به مکان‌های واکنش محدود می‌شود. در نتیجه عملکرد الکتروشیمیایی الکترودها متخلخل تضعیف می‌شود لذا ضروری است که در ساختار الکترودهای متخلخل یک تعادل مناسب بین الکترودها، الکترولیت و فاز گازی ایجاد شود. تلاش‌های اخیر جهت بهبود عملکرد واکنش الکتروشیمیایی، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش ضخامت اجزای پیل سوختی و درعین حال اصلاح و بهبود ساختار الکترودها و فاز الکترولیت متمرکز شده است. الکترولیت با هدایت یون‌ها بین الکترودها سبب تکمیل مدار الکتریکی پیل سوختی می‌شود.

الکترولیت یک مانع فیزیکی بین سوخت و گاز اکسیژن ایجاد می‌کند و مانع اختلاط مستقیم آن‌ها می‌شود. وظیفه صفحات الکترودها متخلخل در پیل سوختی شامل موارد زیر است:

- ۱ - ایجاد یک سطح فعال و مناسب که واکنش‌های الکتروشیمیایی روی این سطوح انجام می‌شود.
- ۲ - هدایت یون‌های حاصل از واکنش به داخل یا خارج از ناحیه تبادل سه فاز و انتقال الکترون‌های تولیدی به مدار خارجی (الکترودها باید هدایت الکتریکی خوبی داشته باشد).

برای افزایش سطح تماس واکنش دهنده‌ها با کاتالیست لازم است که ساختار الکترودها متخلخل بوده و میزان سطح در دسترس و پوشش داده شده توسط کاتالیست نسبت به حجم الکترودها زیاد باشد.

^{۱۲} Porous electrode

^{۱۳} Flood

ساختار متخلخل دسترسی راحت اجزاء واکنش‌دهنده به مراکز فعال را میسر می‌سازد. نرخ واکنش‌های الکتروشیمی با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند، لذا خاصیت کاتالیزوری الکترودها در پیل‌های سوختی دمایی از اهمیت بیشتری در مقایسه با پیل سوختی دمابالا برخوردار است. الکترودهای متخلخل باید در هر دو طرف تماس با الکترولیت و گازهای واکنش‌دهنده، نفوذپذیر باشند تا حدی که توسط الکترولیت اشباع نشده و به‌وسیله گازهای واکنش‌دهنده خشک نشوند.

۱-۲-۱- تاریخچه پیل سوختی

اگرچه پیل سوختی به‌تازگی به‌عنوان یکی از راهکارهای تولید انرژی الکتریکی مطرح شده است ولی تاریخچه آن به قرن نوزدهم و کار دانشمند انگلیسی سرویلیام گرو^{۱۴} برمی‌گردد. او اولین پیل سوختی را در سال ۱۸۳۹ با سرمشق گرفتن از واکنش الکترولیز آب، طی واکنش معکوس و در حضور کاتالیست پلاتین ساخت. واژه پیل سوختی در سال ۱۸۸۹ توسط لودویک مند^{۱۵} و چارلز لنجر^{۱۶} به کار گرفته شد. آن‌ها نوعی پیل سوختی که هوا و سوخت زغال‌سنگ را مصرف می‌کرد، ساختند. تلاش‌های متعددی در اوایل قرن بیستم در جهت توسعه پیل سوختی انجام شد که به دلیل عدم درک علمی مسئله هیچ‌یک موفقیت‌آمیز نبود. علاقه به استفاده از پیل سوختی با کشف سوخت‌های فسیلی ارزان و رواج موتورهای بخار کم‌رنگ گردید. فصلی دیگر از تاریخچه تحقیقات پیل سوختی توسط فرانسیس بیکن^{۱۷} از دانشگاه کمبریج انجام شد. او در سال ۱۹۳۲ بر روی ماشین ساخته‌شده توسط مند و لنجر اصلاحات بسیاری انجام داد. این اصلاحات شامل جایگزینی کاتالیست گران‌قیمت پلاتین با نیکل و همچنین استفاده از هیدروکسیدپتاسیم قلیایی به جای اسیدسولفوریک به دلیل مزیت عدم خوردگی آن می‌باشد. این اختراع که اولین پیل سوختی قلیایی بود، "Bacon Cell" نامیده شد. او ۲۷ سال تحقیقات خود را ادامه داد تا توانست یک پیل سوختی کامل و کارا ارائه نماید.

^{۱۴} Sir William Robert Grove

^{۱۵} Ludwig Mond

^{۱۶} Charles Langer

^{۱۷} Francis Bacon

بیکون در سال ۱۹۵۹ پیل سوختی با توان ۵ کیلووات را تولید نمود که می‌توانست نیروی محرکه یک دستگاه جوشکاری را تأمین نماید. تحقیقات جدید در این عرصه از اوایل دهه ۶۰ میلادی با اوج‌گیری فعالیت‌های مربوط به تسخیر فضا توسط انسان آغاز شد. مرکز تحقیقات ناسا در پی تأمین نیرو جهت پروازهای فضایی باسرنشین بود. ناسا پس از رد گزینه‌های موجود نظیر باتری (به علت سنگینی)، انرژی خورشیدی (به علت گران بودن) و انرژی هسته‌ای (به علت ریسک بالا) پیل سوختی را انتخاب نمود. تحقیقات در این زمینه به ساخت پیل سوختی پلیمری توسط شرکت جنرال الکتریک منجر شد. ایالات متحده فن‌آوری پیل سوختی را در برنامه فضایی Gemini استفاده نمود که اولین کاربرد تجاری پیل سوختی بود. پرت و ویتنی دو سازنده موتور هواپیما پیل سوختی قلیایی بیکون را به‌منظور کاهش وزن و افزایش طول عمر اصلاح نموده و آن را در برنامه فضایی آپولو به‌کار بردند. در هر دو پروژه پیل سوختی به‌عنوان منبع انرژی الکتریکی برای فضاپیما استفاده شدند؛ اما در پروژه آپولو پیل‌های سوختی برای فضاوردان آب آشامیدنی نیز تولید می‌کرد. پس از کاربرد پیل‌های سوختی در این پروژه‌ها، دولت‌ها و شرکت‌ها به این فناوری جدید به‌عنوان منبع مناسبی برای تولید انرژی پاک در آینده توجه روزافزونی نشان دادند. از سال ۱۹۷۰ فن‌آوری پیل سوختی برای سیستم‌های زمینی توسعه یافت. تحریم نفتی از سال ۱۹۷۳-۱۹۷۹ موجب تشدید تلاش دولتمردان امریکا و محققین در توسعه این فن‌آوری به جهت قطع وابستگی به واردات نفتی گشت. در طول دهه ۸۰ تلاش محققین بر تهیه مواد موردنیاز، انتخاب سوخت مناسب و کاهش هزینه استوار بود. همچنین اولین محصول تجاری جهت تأمین نیرومحرکه خودرو در سال ۱۹۹۳ توسط شرکت بلارد ارائه شد.

۱-۲-۲- مزایا و معایب

۱-۲-۲-۱- مزایای پیل سوختی:

پیل سوختی آلودگی ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی را حذف نموده و تنها محصول جانبی آن آب می‌باشد. در صورتی که هیدروژن مصرفی حاصل از الکترولیز آب باشد، نشر گازهای

گلخانه‌ای نیز به صفر می‌رسد. به دلیل وابسته نبودن به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر بنزین و نفت، وابستگی اقتصادی کشورهای ناپایدار اقتصادی را حذف می‌کند. با نصب پیل‌های سوختی نیروگاهی کوچک، شبکه غیرمتمرکز نیرو گسترده می‌گردد. پیل‌های سوختی راندمان بالاتری نسبت به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر نفت و بنزین دارد. هیدروژن در هر مکانی از آب و برق تولید می‌گردد. لذا پتانسیل تولید سوخت، غیرمتمرکز خواهد شد. اکثر پیل‌های سوختی در مقایسه با موتورهای متداول بسیار بی‌صدا هستند. انتقال گرما از پیل‌های دم‌پایین بسیار کم می‌باشد لذا آن‌ها را برای کاربردهای نظامی مناسب خواهد شد. زمان عملکرد آن‌ها از باتری‌های متداول بسیار طولانی‌تر است. فقط با دو برابر نمودن سوخت مصرفی می‌توان زمان عملکرد را دو برابر نمود و نیازی به دو برابر کردن خود پیل نمی‌باشد. سوخت‌گیری مجدد پیل‌های سوختی به راحتی امکان‌پذیر هست و هیچ‌گونه اثرات حافظه‌ای بر جای نمی‌گذارد. به علت عدم وجود اجزای متحرک نگهداری از آن‌ها بسیار ساده است. نصب و بهره‌برداری از پیل‌های سوختی بسیار ساده و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. پیل‌های سوختی مدولار می‌باشند یعنی به راحتی توان تولیدی از آن‌ها قابل افزایش هست. این مولدها قابلیت تولید هم-زمان برق و حرارت را دارند. امکان استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی پاک در آن‌ها وجود دارد.

۱-۲-۲-۲- معایب پیل سوختی:

سوخت‌گیری پیل‌های سوختی مشکل اصلی پیل‌های سوختی است. تولید، انتقال، توزیع و ذخیره به علت نبودن زیرساخت مناسب مشکل می‌باشد. تبدیل هیدروکربن به هیدروژن از طریق مبدل هنوز با چالش‌هایی روبروست و هنوز فناوری کاملاً پاک محسوب نمی‌شود. برد خودروهای پیل سوختی کوتاه‌تر و زمان سوخت‌گیری و استارت زدن طولانی‌تری نسبت به خودروهای متداول دارند. پیل‌های سوختی از باتری‌های متداول سنگین‌تر هستند و محققین در پی کاهش وزن آن‌ها می‌باشند. تولید پیل سوختی به دلیل نداشتن خط تولید هنوز گران است. برخی پیل‌های سوختی از مواد

گران‌قیمت استفاده می‌کنند. این فناوری هنوز کاملاً توسعه‌نیافته و محصولات کمی از آن موجود هست.

۱-۳- خودروهای الکتریکی

علیرغم خودروهای متداول که توسط انرژی حرارتی تولید شده و از احتراق سوخت‌های فسیلی حرکت می‌کنند، خودروهای الکتریکی به الکتریسیته نیاز دارند و الکتریسیته لازم از راه‌های مختلف قابل‌دسترسی هست. یک راه آن استفاده از باتری‌های قابل شارژ است که مشابه آن در خودروهای معمولی به‌عنوان راه‌انداز به کار می‌رود. مزیت خودروهای الکتریکی بدون آلودگی بودن آن‌ها است. البته برای شارژ مجدد باتری‌ها به الکتریسیته نیاز است این الکتریسیته بایستی از یک نیروگاه تأمین شود و البته نیروگاه نیز ایجاد آلودگی می‌کند؛ اما باید در نظر داشت که کنترل آلودگی چند نیروگاه بسیار ساده‌تر و امکان‌پذیرتر از میلیون‌ها خودرو خواهد بود. حتی با احتساب این آلودگی آلاینده‌ی حاصل از خودروی برقی یک‌دهم خودروهای متداول است. تقریباً در حدود ۲۹۰۰ خودروی الکتریکی در سال ۱۹۹۵ در آمریکا استفاده شده است که انتظار می‌رود این تعداد به سبب مقررات سخت کالیفرنیا در خصوص آلودگی، بسیار افزایش یابد. خودروهای الکتریکی با باتری‌های شیمیایی معیبه‌ی را نیز دارا می‌باشند و اگرچه قیمت انرژی الکتریکی موردنیاز برای شارژ آن‌ها نسبتاً پایین است اما هزینه اولیه خودرو بالاست. باتری‌های آن‌ها سنگین بوده و وزن زیادی را به خود اختصاص می‌دهند. قیمتی در محدوده ۱۵۰۰-۴۰۰۰ دلار دارند و بعد از ۵۰۰-۶۰۰ بار دشارژ دور انداخته می‌شوند. محدوده رانش خودروی برقی ۱۳۰ کیلومتر است. به‌علاوه شتاب حرکت آن پایین است، امکان شارژ مجدد بین جاده‌ها وجود ندارد و بایستی شارژ مجدد در منزل برای زمانی حدود چند ساعت صورت گیرد.

مزایای خودروهای برقی:

- راه‌اندازی سریع
- آرام و بی‌سروصدا
- قابل اعتماد
- ذخیره انرژی سینتیکی در حالت توقف^{۱۸}
- رانندگی راحت
- عدم نیاز به سیستم کلاچ و جعبه‌دنده
- نداشتن اجزای متحرک در مقایسه با خودروهای بنزینی
- عدم نیاز به تعویض روغن، فیلترهای سوخت، تزریق سوخت و ...
- آلایندگی تقریباً صفر
- راندمان تبدیل انرژی بالا در مقایسه با راندمان 25 درصدی خودروهای بنزینی
- حداقل نیاز به تعمیرات و نگهداری

۱-۴- خودروهایی پیل سوختی

۱-۴-۱- خودروهایی پیل سوختی (ساده)

در خودروهای پیل سوختی، خود پیل سوختی به‌عنوان منبع تولید توان بوده و هیچ‌گونه باتری کمکی در آن استفاده نمی‌شود. پیل سوختی مشابه باتری خودروهای برقی جریان الکتریسیته

^{۱۸} Regenerative breaking

موردنیاز موتور و نیروی محرکه را تولید می‌کند. سیستم نیرومحرکه شامل یک معکوس کننده برای تبدیل جریان پیل سوختی از DC به AC با فرکانس و ولتاژ متغیر، یک رتور AC و یک سیستم انتقال نیرو از موتور به چرخ‌های ماشین می‌باشد.

۱-۴-۲- خودروهای پیل سوختی ترکیبی (هایبریدی)

یک خودروی پیل سوختی ترکیبی دارای یک باتری با یک خازن با ظرفیت بالا به صورت موازی با سیستم پیل سوختی است. پیل سوختی ترکیبی به طور همزمان از بیشترین بازده انرژی پیل سوختی و نیز توان بالای موجود در باتری استفاده می‌نماید. در هنگامی که مصرف انرژی بالاست مانند حالت شتاب، توان موردنیاز ماشین را باتری و مجموعه پیل سوختی تأمین خواهند کرد. وقتی میزان مصرف انرژی پایین باشد، مانند حرکت در خیابان، پیل سوختی توان موردنیاز را تأمین می‌کند. باتری‌ها در طی مدت زمانی که مصرف انرژی پایین است شارژ خواهند شد؛ بنابراین برای تأمین توان و انرژی موردنیاز، پیل سوختی برای حرکت معمولی و باتری برای ماکزیمم توان، طراحی می‌شوند. انتخاب مجموعه باتری به عواملی چون هزینه و عملکرد پیل سوختی و فناوری ساخت باتری و سیکل حرکتی بستگی دارد.

استفاده از باتری امکان راه‌اندازی سریع را به خودروی پیل سوختی داده و آن را در مقابل واکنش معکوس در پیل سوختی طی عملکرد و سوخت توده محافظت می‌نماید. به علاوه باتری حداکثر توان موردنیاز را تأمین می‌کند؛ و انرژی تولیدی می‌تواند بازیابی شود. زمان پاسخ سیستم خودرو به تغییرات بار در حالت وجود باتری سریع‌تر هست. پیل سوختی ترکیبی دارای عملکرد خوب، زمان کارکرد طولانی و زمان سوخت‌گیری سریع بوده و مسافت قابل توجهی را طی می‌کند.

سایر مزایای وجود باتری عبارت‌اند از:

● عدم نیاز خودرو به پیش گرم کردن پیل سوختی برای راه‌اندازی خودرو

● توانایی عملکرد خودرو در حالت کاملاً برقی طی زمانی که سیستم پیل قادر به عملکرد در سطح ولتاژ اسمی خود نیست.

● زمان پاسخ بسیار سریع‌تر برای تغییرات بار

از جمله معایب وجود باتری می‌توان هزینه، وزن، زمان شارژ مجدد بالای آن باشد که به خودرو تحمیل می‌شود. هزینه یک مجموعه باتری معمولاً متناسب با مقدار انرژی‌ای که می‌تواند ذخیره نماید و هزینه پیل سوختی متناسب با میزان توان خواسته شده است. لذا یک باتری با ظرفیت توان بالا و ذخیره انرژی متوسط ممکن است کمی گران باشد.

۱-۴-۳- انواع پیل‌های سوختی مورد استفاده در صنعت خودرو

در زیر پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد و متانول مستقیم که مستقیماً مربوط به صنعت خودرو می‌باشند، شرح داده خواهند شد.

۱-۴-۳-۱- پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد:

پیل سوختی الکترولیت پلیمر جامد از یک غشاء تبادل یون به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. این نوع پیل‌ها ابتدا در برنامه فضایی ایالات متحده (Gemini) در دهه ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار گرفت. امروز استفاده از این فناوری در رابطه با حمل‌ونقل مورد تأکید است.

۱-۴-۳-۲- پیل سوختی متانول مستقیم^{۱۹}:

در وسایل نقلیه الکتریکی یک راه‌حل خوب استفاده از پیل سوختی متانول مستقیم (DMFC) است. در حدود سی سال است که تحقیقات بر روی آن آغاز شده است و کاربرد آن در وسایل نقلیه رویای محققان پیل سوختی محسوب می‌گردد.

^{۱۹} Direct methanol fuel cell

گرچه متانول ساده‌ترین ماده آلی است اما فعالیت الکتروشیمیایی آن حدود سه درجه کمتر از هیدروژن هست و از این رو چگالی جریان تولید آن پایین است. به علاوه فعالیت کاتالیزور در این نوع پیل سوختی به دلیل مسمومیت به شدت افت می‌کند. علیرغم این مشکلات که بایستی رفع گردد استفاده از پیل سوختی متانول مستقیم به علت حمل و نقل راحت متانول و نداشتن مشکلات ذخیره‌سازی و امنیتی هیدروژن بسیار مورد توجه محققان است.

۱-۴-۴-اهداف پایان‌نامه

این پایان‌نامه در واقع در جهت رفع قسمتی از مشکلات و موانع موجود در راه تجاری کردن و تولید انبوه خودروهای پیل سوختی صورت گرفته است. در این خودروها همواره قیمت بالای باتری‌ها و پیل سوختی یک مشکل اساسی جهت تجاری کردن آن‌ها محسوب می‌شود. هدف اصلی در این پایان‌نامه پس از بررسی تأثیر پارامترهای مختلف موجود در باتری و پیل سوختی بر عملکرد خودرو و تعریف یک تابع هزینه که هزینه خودرو را معطوف به هزینه منابع تغذیه خودرو یعنی باتری و پیل سوختی و همچنین قیمت هیدروژن مصرفی پیل و توان دریافتی از شبکه می‌داند، اقدام به بدست آوردن یک مقدار بهینه اقتصادی برای ظرفیت باتری و حداکثر توان مورد نیاز پیل سوختی برای یک خودروی سواری می‌نماییم. در واقع با بدست آوردن این مقادیر گامی در جهت پایین آوردن قیمت این خودروها برمی‌داریم.

۱-۴-۵-ساختار پایان‌نامه

پس از مقدمه، در فصل دوم به بررسی و مقایسه ساختار انواع خودروهای برقی، هایبریدی و پیل سوختی می‌پردازیم. هر کدام از این خودروها دارای توانایی و محدودیت خاص مربوط به خود می‌باشند که این محدودیت‌ها و توانایی‌ها تا حدود زیادی به معماری خودرو و سیستم نیرومحرکه آن بستگی دارد.

در فصل سوم، ساختار خودروی برقی پیل سوختی متصل به شبکه معرفی می‌شود. در ادامه با بیان معادله‌ی دینامیک حرکت خودرو به بررسی و نحوه محاسبه پارامترهایی مهم در بحث مربوط به عملکرد خودرو می‌پردازیم. در پایان نیز با بیان مسئله بهینه‌سازی تابع هدف را مشخص می‌کنیم.

در فصل چهارم تأثیر پارامترهای انتقال توان نظیر ظرفیت باتری (C_{bat})، مقاومت الکتریکی باتری (R_{bat})، حداکثر توان پیل سوختی (P_{fc-max})، راندمان پیل سوختی (η_{fc})، جرم هیدروژن مخزن (m_{hydro}) و توان جانبی (P_{aux}) بر عملکرد خودرو را مورد بررسی قرار می‌دهیم و با در نظر گرفتن تأثیر هر پارامتر بر عملکرد خودرو اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی می‌نماییم. پس از حل مسئله با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR صحت نتایج حاصل را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در فصل پنجم به حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با ترکیب این الگوریتم با نرم‌افزار ADVISOR می‌پردازیم.

در فصل ششم نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کلی نسبت به نتایج و خروجی‌ها می‌پردازیم و با توجه به نتایج و اطلاعات موجود، پیشنهادهای را در زمینه بهبود و ادامه پژوهش در این زمینه ارائه می‌دهیم.

فصل دوم:

معرفی انواع ساختار خودروهای برقی و

پیل سوختی

تکنولوژی خودروها را می‌توان به صورت خودروهای احتراق داخلی ICE و خودروهای بر پایه‌ی نیرومحرکه الکتریکی دسته‌بندی کرد. وسایل نقلیه الکتریکی به طور نسبی یا کامل به وسیله‌ی سیستم الکتریکی هدایت می‌شوند و به صورت: خودروهای الکتریکی EVs، خودروهای الکتریکی هایبرید HEVs، خودروهای الکتریکی هایبرید متصل به شبکه^{۲۰} PHEVs، خودروهای پیل سوختی^{۲۱} FCVs و خودروهای پیل سوختی متصل به شبکه^{۲۲} PFCVs دسته‌بندی می‌شوند. در این بین هرکدام از خودروها دارای توانایی و محدودیت خودش در قالب چگالی انرژی، چگالی توان، نرخ انتشار آلودگی، کارایی، مصرف اقتصادی سوخت، اندازه، وزن، هزینه و ایمنی می‌باشد. این فاکتورها تا حد زیادی وابسته به معماری خودرو و سیستم نیرومحرکه آن هستند. از بین چند گروه وسیله‌ی الکتریکی ذکر شده در بالا که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، خودروهای الکتریکی هایبرید (HEV) تنها گزینه‌ای می‌باشند که دارای پتانسیل، جهت رقابت با وسایل نقلیه ICE در قالب کارایی دینامیکی، مصرف اقتصادی سوخت و هزینه می‌باشند. مزایای اصلی HEV عبارت‌اند از: طی مسافت بیشتر در حالت الکتریکی، مصرف پایین سوخت، راندمان بالاتر، توان کافی در دسترس و پاسخ دینامیکی بهتر. در نتیجه معماری‌های گوناگون آن مورد بررسی قرار می‌گیرد به نحوی که شامل ساختارهای سری، موازی، سری-موازی و مختلط^{۲۳} می‌باشد.

۲-۲- خودروهای احتراق داخلی ICE

قبل از ورود به تکنولوژی وسایل نقلیه الکتریکی پیشرفته، آگاهی یافتن از بنیادهای موتور احتراق داخلی معمولی (ICE) برای سیستم وسایل نقلیه مهم می‌باشد. یک خودرو ICE معمولی

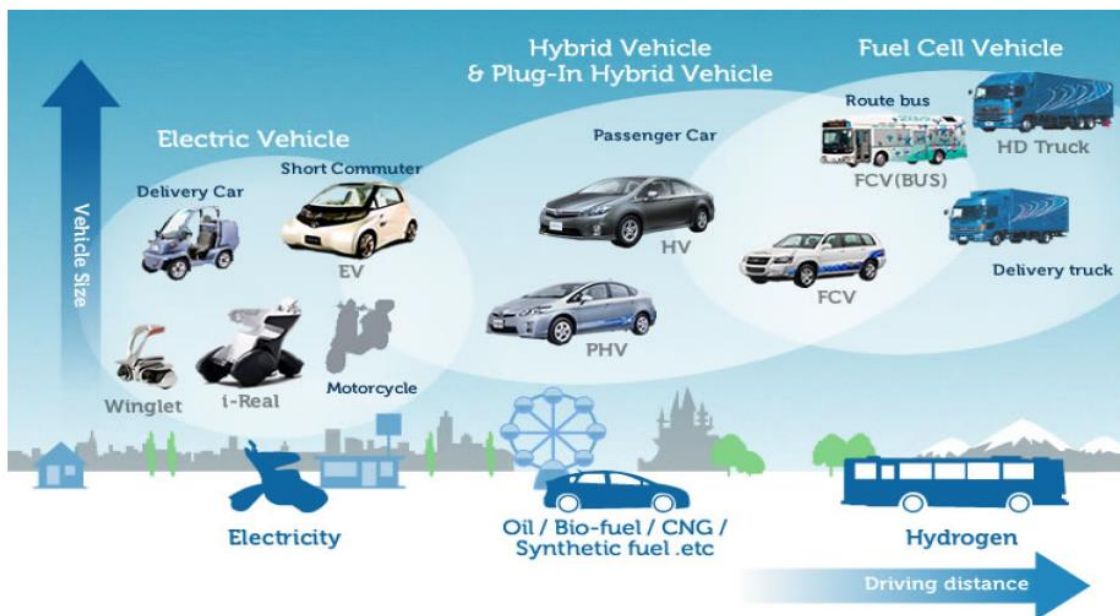
^{۲۰} Plug in hybrid electric vehicles

^{۲۱} Fuel cell vehicles

^{۲۲} Plug in fuel cell vehicle

^{۲۳} Complex

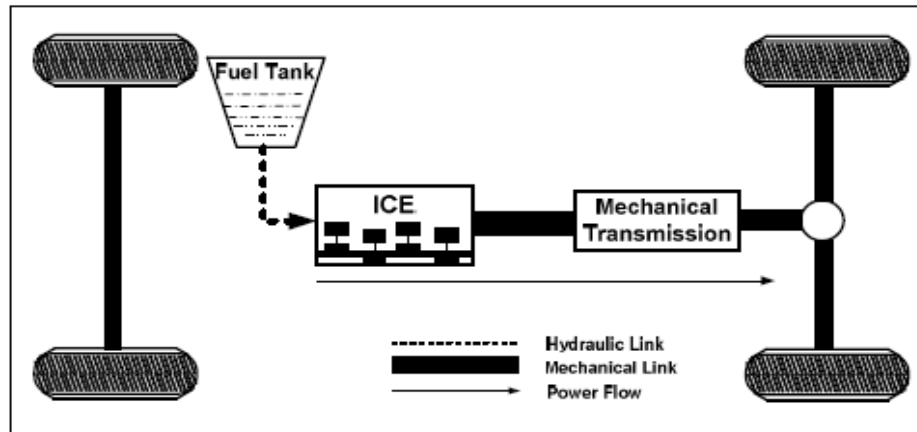
سوختی پتروشیمی با چگالی انرژی بالا را در اتاقک احتراقش می‌سوزاند و قدرتی را به وجود می‌آورد که می‌تواند برای به حرکت درآوردن وسایل نقلیه با استفاده از سیستم انتقال مکانیکی به صورتی که



شکل (۱-۲): طبقه‌بندی انواع مختلف خودروها بر اساس اندازه و مسافت طی شونده [۴]

در شکل (۲-۲) نشان داده شده استفاده کرد. در واقع این خودرو شامل یک مخزن سوخت با منبع انرژی با چگالی بالا در دسترس، موتور احتراق داخلی و یک سیستم مکانیکی برای انتقال توان از موتور به چرخ‌ها می‌باشد [۵]. وسایل نقلیه ICE دارای سیکل رانندگی طولانی، به دلیل چگالی انرژی بالای سوخت‌های مایع هیدروکربنی و همچنین زمان سوخت‌گیری کوتاه جهت پر کردن مجدد منبع در مقایسه با شارژ کردن باتری وسایل نقلیه الکتریکی، دارای برتری می‌باشند. اشکال اصلی وسایل نقلیه ICE راندمان پایین آن‌ها برای تبدیل سوخت به توان مفید و انتشار آلودگی زیاد می‌باشد که تأثیری زیادی بر روی محیط‌زیست دارد. دلیل اصلی عدم کارایی وسایل نقلیه ICE ناسازگاری مشخصه توان موتور با مشخصه بار خودرو، راندمان پایین انتقال مکانیکی و اتلاف انرژی جنبشی در طول فرآیند ترمز می‌باشد. با این حال موتورهای احتراق داخلی بیش‌تر از یک قرن استفاده شده‌اند و

پیشرفت‌های فراوانی در مصرف سوخت، راندمان بالای مصرف انرژی و کاهش انتشار آلودگی به دست آمده است و همچنان تحقیقات زیادی برای بهینه‌سازی این خودروها در حال انجام می‌باشد.



شکل (۲-۲): ساختار خودرو ICE [۶]

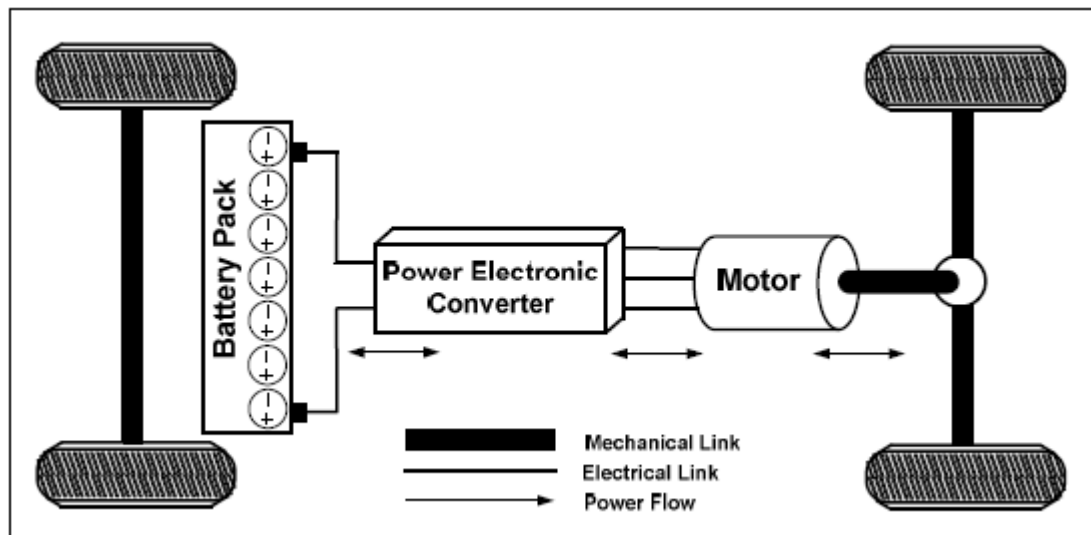
۲-۳- خودروهای الکتریکی باتری دار

مفهوم BEVs^{۲۴} بر مبنای دستگاه‌های الکتریکی که شامل منبع تغذیه، مبدل الکتریکی و موتور الکتریکی به صورتی که در شکل (۲-۳) نشان داده شده می‌باشد. اولین BEV در قرن نوزدهم اختراع شده است و توجه زیادی از مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان خودرو را در دوره‌ی ۱۸۸۰ تا ۱۹۲۰ را به خود جلب کرده است. در حقیقت تا سال ۱۹۱۰ وسایل نقلیه‌ی الکتریکی از لحاظ تعداد نسبت به وسایل نقلیه‌ی بر پایه‌ی ICE بیش‌تر بودند. با این حال، به دلیل محدودیت‌های مرتبط با باتری‌ها و پیشرفت سریع در وسایل نقلیه‌ی ICE همانند هزینه‌های پایین سوخت‌های دیزلی و بنزین، BEV قادر به رقابت با ICE نشده‌اند. نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با مقدار آلودگی‌های آزاد شده در اتمسفر به‌وسیله‌ی وسایل نقلیه‌ی ICE، قیمت ناپایدار سوخت‌های فسیلی در بازار جهانی و قوانین متنوع و سخت‌گیرانه انتشار آلودگی مفهوم وسایل نقلیه‌ی با انتشار آلودگی صفر^{۲۵} (ZEV) را مطرح نمود. BEV دارای مزیت‌های مختلفی مانند: انتشار آلودگی صفر، راندمان بالا، کم‌صدا بودن، ایمنی

^{۲۴} Battery electric vehicles

^{۲۵} Zero emission vehicle

بالا و عدم وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌باشند. علاوه بر این زمانی که راندمان بیشینه‌ی وسایل نقلیه ICE می‌تواند در حدود ۳۰-۳۵٪ باشد، سیستم نیرومحرکه الکتریکی می‌تواند پیک کارایی ۹۰٪ از باتری کار کند. همچنین وسایل الکتریکی توانایی ذخیره انرژی جنبشی اتلافی در طول فرآیند ترمزگیری را دارا می‌باشند [۷]. جدا از مزیت‌های متعدد، این خودروها دارای محدودیت‌هایی مانند زمان شارژ طولانی باتری و کارایی دینامیکی محدود می‌باشند. محدودیت مهم BEV محدودی عملیاتی محدود آن در هر چرخه شارژ باتری می‌باشد. عیب اصلی این خودروها وابستگی کامل آن‌ها به باتری می‌باشد که تکنولوژی آن هنوز به لحاظ ظرفیت و چگالی انرژی، قابل مقایسه با سوخت‌های فسیلی نیست.

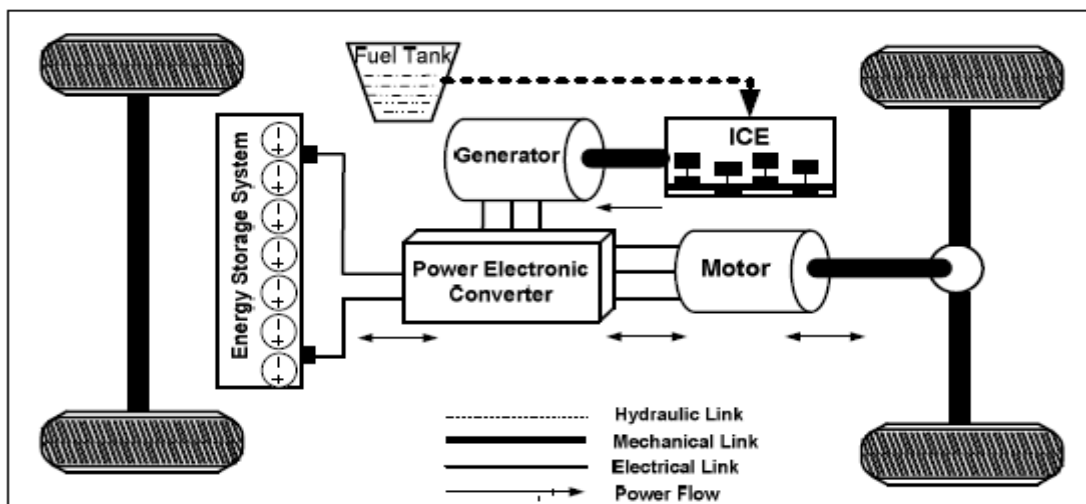


شکل (۲-۳): ساختار BEV [۶]

۲-۴- خودروهای الکتریکی هایبرید سری

ساختمان این خودروها ساده‌ترین حالت HEV می‌باشد به نحوی که یک موتور احتراق داخل به طور مکانیکی به ژنراتور الکتریکی متصل شده است که این ژنراتور نیز به موتور الکتریکی و پکیج باتری همراه با مبدل‌های الکترونیکی مطابق با شکل (۲-۴) متصل شده است. ژنراتور توان مکانیکی ICE را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. این توان الکتریکی می‌تواند برای شارژ کردن باتری بکار رود

یا می‌تواند برای تأمین کردن توان لازم موتور الکتریکی برای به حرکت درآوردن خودرو استفاده شود یا هر دو حالت می‌تواند به صورت هم‌زمان رخ دهد. انتقال توان از مخزن سوخت تا مبدل الکترونیک قدرت تک جهت می‌باشد درحالی که انتقال توان از باتری تا موتور الکتریکی دو جهت می‌باشد. در واقع، ICE به عنوان کمک دهنده EVs می‌باشد و هیچ ارتباط مکانیکی بین ICE و چرخ‌ها وجود ندارد. زمان شروع/پایان کار ICE به وسیله‌ی سطح شارژ باتری^{۲۶} (SOC) کنترل می‌شود. در زمانی که باتری به SOC کمینه‌ی از قبل تنظیم شده برسد، ICE به جهت شارژ کردن باتری شروع به کار می‌کند. زمانی که باتری به SOC بیشینه‌ی مطلوب برسد، ICE متوقف می‌گردد. الگوریتم کنترلی بهینه برای عملیات ICE در راندمان بالا و مصرف سوخت کم طوری انتخاب شده است که سطح شارژ باتری می‌بایست در حدود ۶۵-۷۵٪ شارژ کامل نگه داشته شود [۱]. از این رو، تأمین توان از منابع انرژی برای چرخ‌ها در دو مرحله تبدیل توان (مکانیکی به الکتریکی و الکتریکی به مکانیکی) انجام می‌شود که منجر به افزایش اتلاف انرژی و کاهش راندمان کلی می‌گردد.



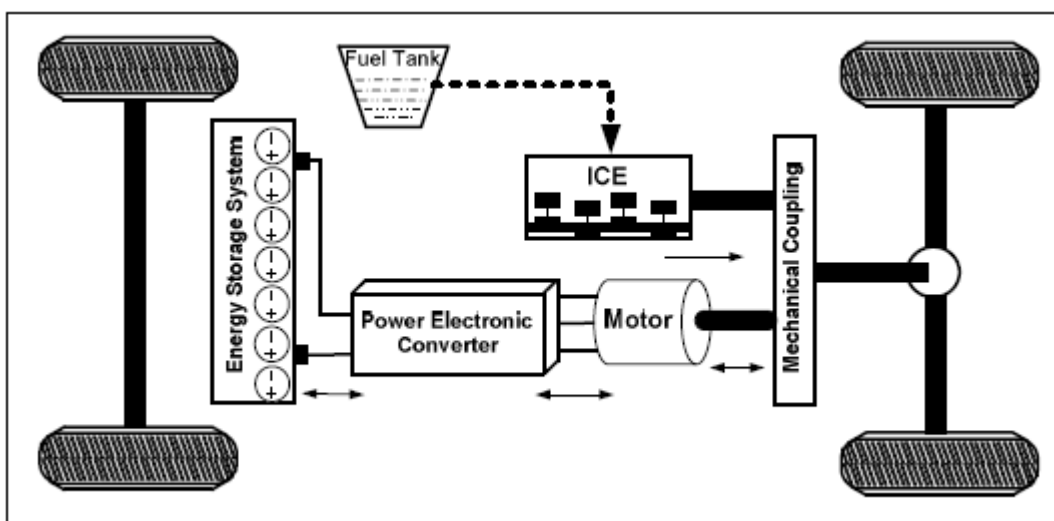
شکل (۲-۴): ساختار SHEV^{۲۷} [۶]

^{۲۶} State of charge

^{۲۷} Series hybrid electric vehicle

۲-۵- خودروی الکتریکی هایبرید موازی

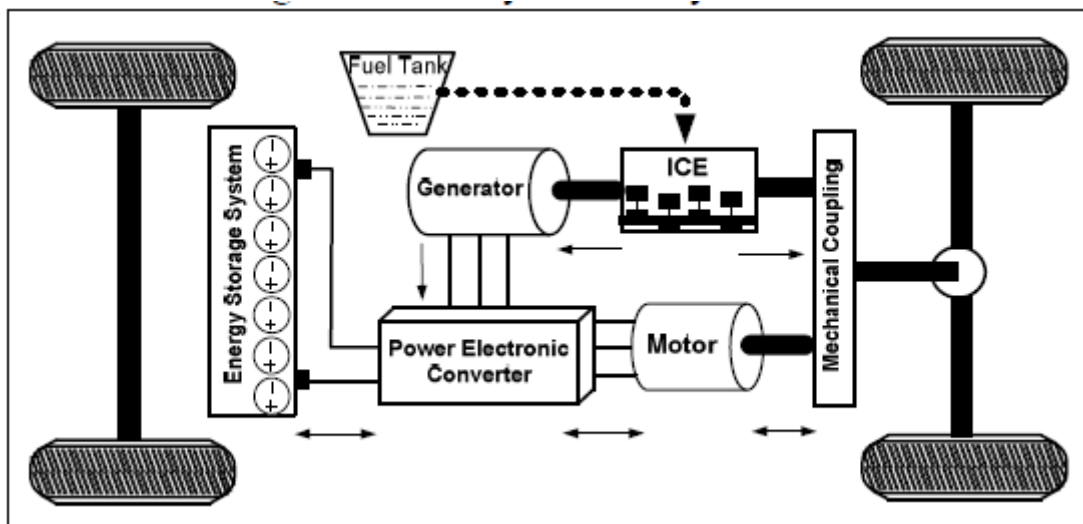
در ساختمان خودروهای موازی، موتور الکتریکی و ICE به صورت موازی با هم متصل می‌شوند. مطابق با شکل (۲-۵) هر دو موتور قادر به انتقال توان به چرخ‌ها به صورت هم‌زمان یا تنهایی می‌باشند. توان حاصل از موتور الکتریکی و ICE با یکدیگر به کمک یک سیستم مکانیکی ترکیب می‌شود. ساختار هایبرید موازی اساساً از یک چرخه تولید همراه با منبع انرژی در موازات آن تشکیل شده است. در این ساختار موتور درون‌سوز همچنان به وسیله جعبه‌دنده به چرخ‌ها متصل است و با چرخش دنده‌ها محدود می‌شود. در نتیجه بار ICE همچنان به طور مستقیم با توان درخواستی متغیر خودرو پیوند دارد، همچنین از سیستم الکتریکی نیز برای به حرکت درآوردن خودرو استفاده می‌شود و هنگامی که به حداکثر نیرو نیاز است هر دو با همدیگر آغاز به انتقال نیرو به چرخ می‌کنند. در خودرو هایبرید موازی به دو محرک نیرو احتیاج است؛ موتور درون‌سوز و موتور الکتریکی. مزیت این ساختار بر ساختار هایبرید سری این است که از موتور درون‌سوز و همچنین از موتور الکتریکی کوچک‌تری برای ایجاد حداکثر عملکرد بهینه تا زمانی که باتری تمام نشده است، می‌توان استفاده کرد [۷].



شکل (۲-۵): ساختار خودروی هایبرید موازی [۶]

۶-۲- خودروی هایبرید سری- موازی

در ساختار هایبرید سری- موازی، برای استفاده از مزایای هرکدام و رفع معایب آن‌ها، ساختارهای هایبرید سری و هایبرید موازی ترکیب می‌شود، در این ترکیب یک المان مکانیکی اضافی در مقایسه با هایبرید سری و یک ژنراتور اضافی در مقایسه با هایبرید موازی اضافه می‌شود. در این خودرو توان ایجادشده در موتور درون‌سوز به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم شده و بخش الکتریکی به‌گونه‌ای کنترل می‌شود که این موتور در نقطه بهینه خود کار کند. این کار توسط بخش جداکننده توان صورت می‌پذیرد و بخش ذخیره انرژی (باتری)، انرژی الکتریکی حاصل از این کار را علاوه بر انتقال به موتور الکتریکی، ذخیره می‌کند [۸].

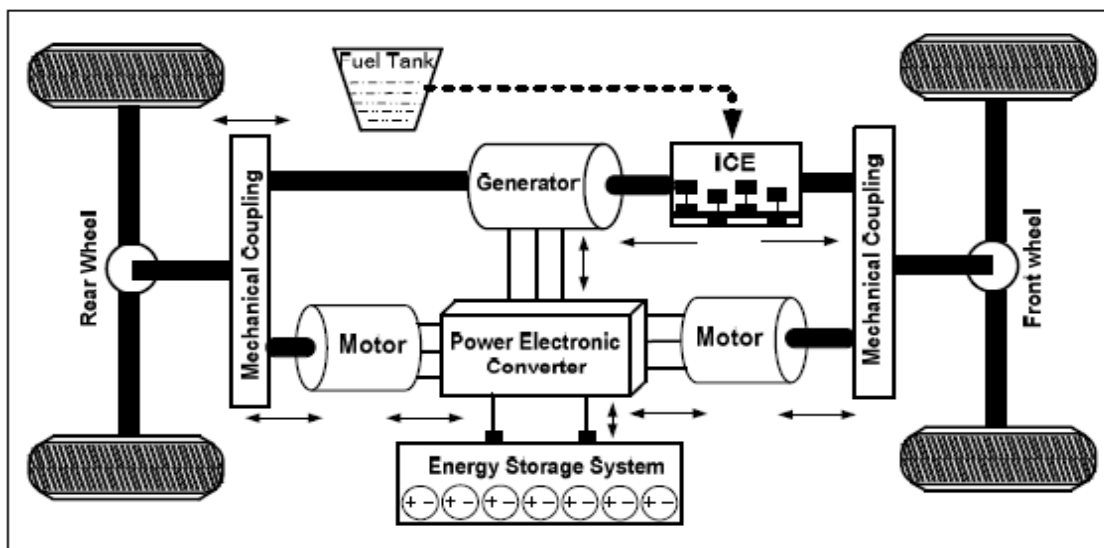


شکل (۶-۲): ساختار خودروی هایبرید سری- موازی [۶]

۷-۲- خودروی هایبرید مختلط

ساختارهایی که تاکنون بحث شده‌اند برای خودروهایی که سیستم نیروی محرکه تک‌محوری دارند می‌باشد. برای داشتن یک سیستم دو محور یعنی سیستم انتقال قدرت برای چرخ‌های جلو و عقب الگوی جدید ترکیبی به‌عنوان ساختار ترکیبی برای سیستم نیروی محرکه‌ی دوگانه طراحی شده است. در این معماری، هم چرخ‌های عقب و جلو به صورتی که در شکل (۷-۲) نشان داده شده حرکت می‌-

کنند. در این سیستم، محورهای چرخ جلو و چرخ عقب از همدیگر مجزا هستند و هیچ اتصال مکانیکی بین آنها وجود ندارد. ازین رو هر دو محور به طور مستقل کار می کنند. در معماری مختلط، ژنراتور الکتریکی انتقال توان دو جهته را پیشنهاد می کند درحالی که در نوع سری-موازی آن انتقال توانی تک جهته را پیشنهاد می کند. ازین رو، هر دو نوع ساختار شامل ICE، ژنراتور و موتور برای به حرکت درآوردن وسیله هستند. توانایی معماری مختلط برای هدایت چرخ ها در هر دو صورت الکتریکی یا هایبرید یا ترکیب هر دوی آنها، انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان بیشتری را به وجود می آورد. چرخ های جلو به وسیله ی سیستم حرکت هایبرید و چرخ های عقب به وسیله ی سیستم حرکتی الکتریکی یا برعکس رانده می شوند.



شکل (۷-۲): ساختار خودروی هایبرید مختلط [۶]

۸-۲- خودروی هایبرید با قابلیت اتصال به شبکه

اولین خودروی هایبرید با قابلیت اتصال به پریز برق را شرکت جنرال موتورز در اواخر دهه ۱۹۶۰ معرفی کرد و بدین ترتیب آغاز شروع به تعریف PHEV^{۲۸} را می توان به آن زمان مربوط دانست. IEEE این نوع خودروها رو به این صورت معرفی می کند: هر وسیله ی نقلیه ی الکتریکی هایبرید که حداقل

^{۲۸} Plug-in hybrid electric vehicle

دارای یکی از موارد زیر باشد: (۱) سیستم ذخیره‌ساز باتری با ظرفیت بیش‌تر از 4 kwh که برای حرکت خودرو مورد استفاده باشد. (۲) شارژ مجدد سیستم باتری از منبع خارجی الکتریسیته صورت گیرد؛ و (۳) توانایی پیمودن حداقل ۱۰ مایل در حالت الکتریکی درحالی‌که از هیچ سوخت بنزینی استفاده نشود. به‌صورت مفهومی PHEV یک نوع HEV با پکیج باتری بزرگ‌تر می‌باشد که قابلیت شارژ از منبع خارجی را به‌صورت شکل (۲-۸) دارا می‌باشد. در این وسایل نقلیه، علاوه بر مخزن بنزین، پکیج باتری نیز می‌تواند به‌وسیله‌ی منبع خارجی برای گسترش محدوده مسافت الکتریکی^{۲۹} (AER) شارژ گردد. زمانی که پکیج باتری به‌وسیله‌ی منبع خارجی به‌طور کامل شارژ گردد، PHEV به‌صورت EV همراه با AER گسترده عمل می‌کند و سپس زمانی که باتری به SOC از قبل تعریف‌شده‌ی خودش برسد یا نیاز به توان اضافی برای شتاب‌دهی داشته باشد، به حالت هایبرید تغییر پیدا می‌کند [۱۰، ۱۱]. همه‌ی انواع HEV می‌توانند به‌راحتی به PHEV تبدیل شوند. PHEV علاوه بر توانایی جهت شارژ شدن باتری از شبکه همچنین توانایی تأمین توان مورد نیاز شبکه در ساعات پیک بار را نیز دارد [۱۲]. هنگامی‌که به خودروهای الکتریکی پارک شده و متصل به شبکه به‌عنوان منابع ارائه‌دهنده خدمت به شبکه برق نگاه شود، ورود به بحث V2G^{۳۰} صورت گرفته است. به‌بیان دیگر V2G به معنای استفاده از ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی برای ارائه توان الکتریکی یا خدمات جانبی به شبکه قدرت است. تمام وسایل نقلیه با توانایی V2G می‌بایست مطابق با استاندارد IEEE 1547 عمل کنند [۱۳].

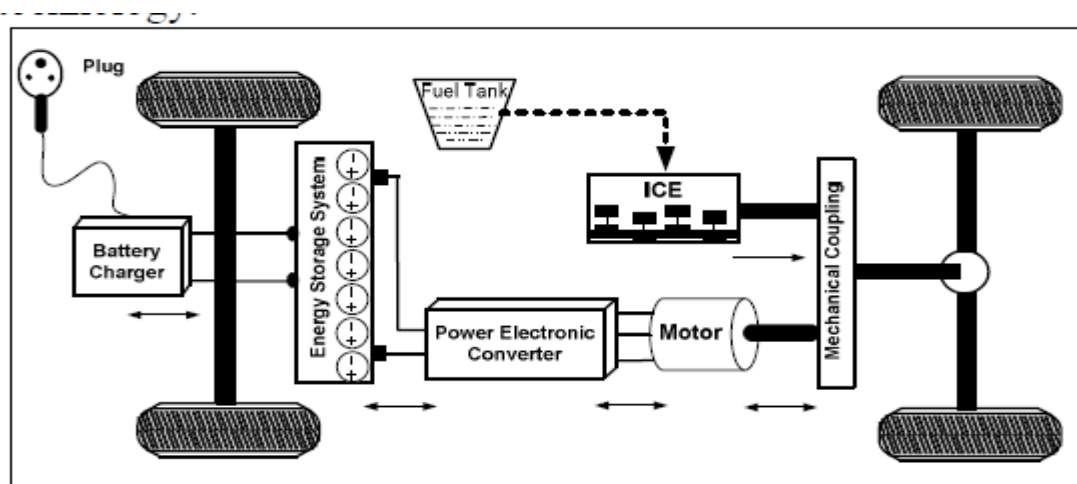
۲-۹- خودروی پیل سوختی

در خودروهای پیل سوختی، خود پیل و توده سوختی آن به‌عنوان منبع تولید توان بوده و هیچ‌گونه باتری کمکی در آن استفاده نمی‌شود. پیل سوختی مشابه باتری خودروهای برقی جریان الکتریسیته مورد نیاز موتور و نیروی محرکه را تولید می‌کند. سیستم نیرومحرکه شامل یک معکوس کننده برای

^{۲۹} All electric range

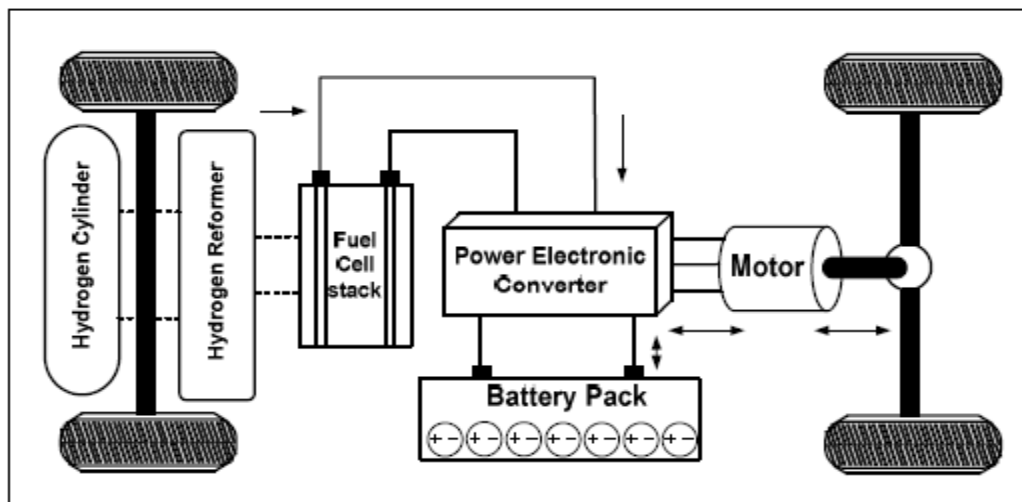
^{۳۰} Vehicle to grid

تبدیل جریان پیل سوختی از DC به AC با فرکانس و ولتاژ متغیر، یک رتور AC و یک سیستم انتقال نیرو از موتور به چرخ‌های ماشین می‌باشد. یک خودروی پیل سوختی ترکیبی همانند شکل (۲-۹) دارای یک باتری با یک خازن با ظرفیت بالا به صورت موازی با سیستم پیل سوختی است. طول عمر خودروهای پیل سوختی زمانی که در نقطه تعادل خود کار می‌کند نسبت به حالت دینامیک بسیار بیشتر می‌باشد [۱۴].



شکل (۲-۸): ساختار PHEV [۴]

به همین دلیل برای ما مطلوب می‌باشد که از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری یا ابر خازن) برای سیستم پیل سوختی استفاده کنیم پیل سوختی هایبرید به طور هم‌زمان از بیشترین بازده انرژی پیل سوختی و نیز توان بالای موجود در باتری استفاده می‌نماید. در هنگامی که مصرف انرژی بالاست مانند حالت شتاب، توان موردنیاز ماشین را باتری و مجموعه پیل سوختی تأمین خواهند کرد. وقتی میزان مصرف انرژی پایین باشد، مانند حرکت در خیابان، پیل سوختی توان موردنیاز را تأمین می‌کند. باتری‌ها در طی مدت‌زمانی که مصرف انرژی پایین است شارژ خواهند شد؛ بنابراین برای تأمین توان و انرژی موردنیاز، پیل سوختی برای حرکت معمولی و باتری برای رسیدن به حداکثر توان، طراحی می‌شوند. انتخاب مجموعه باتری به عوامل چون هزینه و عملکرد پیل سوختی و فناوری ساخت باتری و سیکل حرکتی بستگی دارد.



شکل (۲-۹): خودروی هایبرید پیل سوختی [۶]

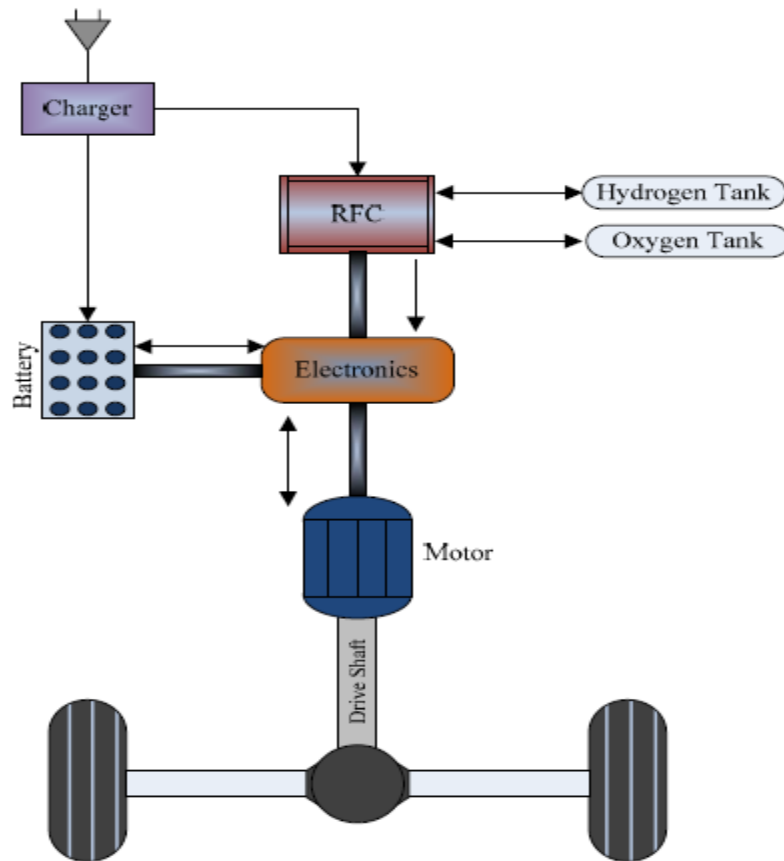
۲-۱۰- خودرویی هایبرید پیل سوختی متصل به شبکه

این خودروها از لحاظ ساختاری مشابه خودروهای پیل سوختی معرفی شده در شکل (۲-۹) می باشند و تنها تفاوت آن ها قابلیت اتصال این خودروها به شبکه می باشد. باتری این خودروها توانایی شارژ شدن از شبکه را دارند. عملکرد این خودروها به نحوه ی تعیین اندازه اجزا تشکیل دهنده آن در مرحله تولید خودرو و استراتژی کنترلی انتخاب شده برای آن ها بستگی دارد [۱۵، ۱۶].

۲-۱۱- مروری بر پژوهش های قبلی در زمینه طراحی خودروهای پیل سوختی

در ارتباط با مسئله تعیین سائز خودروهای پیل سوختی اخیراً مطالعاتی انجام شده است. در [۱۷] یک روش بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تعیین اندازه بهینه پارامترهای انتقال توان در یک خودروی پیل سوختی متصل به شبکه انجام شده است. در این مقاله برای خودرو مانند شکل (۲-۱۰) از یک پیل سوختی از نوع RFC^{۳۱} استفاده شده است. این نوع از پیل ها می توانند در دو حالت کار کنند یعنی هم به عنوان پیل سوختی عمل می کنند و هم می تواند به عنوان الکترولایزر عمل کند و با استفاده از برق شبکه اقدام به تولید هیدروژن کند.

^{۳۱} Regenerative fuel cell

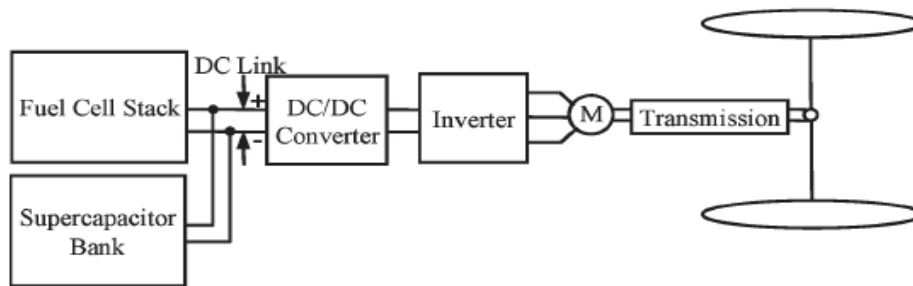


شکل (۲-۱۰): ساختار خودروی پیل سوختی متصل به شبکه با پیل سوختی RFC [۱۷]

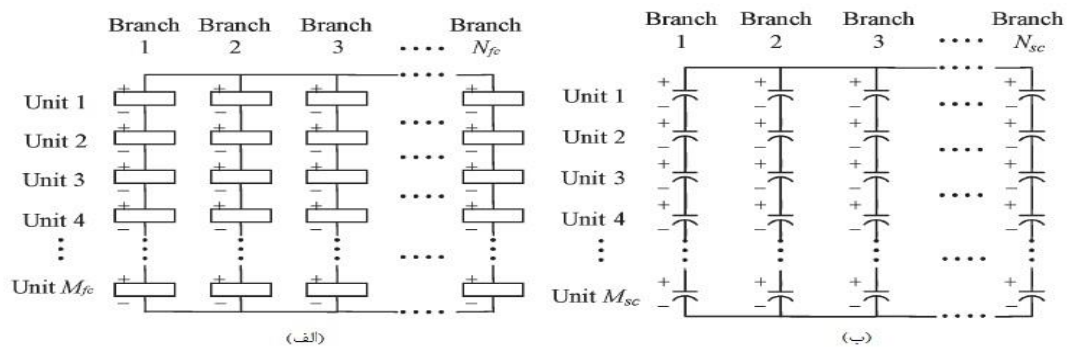
در [۱۸] از یک ابرخازن^{۳۲} مانند شکل (۲-۱۱) به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده شده است. یک طراحی بهینه برای حداقل کردن هزینه پیل سوختی و ابر خازن در یک خودروی پیل سوختی ارائه شده است و فرض شده است که هزینه پیل سوختی و ابر خازن به صورت تابعی از تعداد واحدهای تشکیل دهنده هرکدام به ترتیب می باشد. در واقع با در نظر گرفتن پیل سوختی و ابرخازن به صورت شکل (۲-۱۲) و نوشتن تابع هزینه بر اساس تعداد واحدهای سری و موازی باتری و پیل سوختی سعی در کمینه کردن این تابع می نماید.

^{۳۲} Super capacitor

در [۱۹] یک روش تعیین اندازه بهینه برای یک سیستم هایبرید پیل سوختی در یک زیردریایی بدون سرنشین پیشنهاد شده است. در این مطالعه سیستم پیل سوختی به وسیله ی باتری و ابرخازن به طور همزمان هایبرید شده است. نتایج نشان می دهد که سیستم ذخیره سازی هیدروژن و اکسیژن تأثیر زیادی بر روی تعیین سائز و مدت زمان انجام مأموریت زیردریایی دارد.



شکل (۲-۱۱): استفاده از ابر خازن در خودروی پیل سوختی [۱۸]



شکل (۲-۱۲): نحوه آرایش پیل سوختی (ب) ساختار و آرایش پیل سوختی [۱۸]

در [۲۰] به ارائه یک روش بهینه سازی برای یک اتوبوس شهری با استفاده از مدل تئوری و به دست آوردن روابط بین عملکرد خودرو و پارامترهای انتقال توان آن پرداخته است.

فصل سوم:

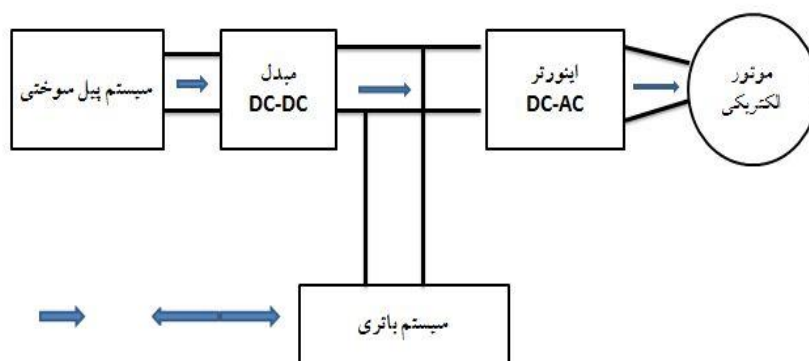
مدل سازی ریاضی خودروی برقی پیل

سوختی و معرفی تابع هدف

۳-۱- مدل تئوری خودرو

۳-۱-۱- ساختار خودروی هایبرید پیل سوختی

شکل (۳-۱) ساختار خودروی برقی پیل سوختی متصل به شبکه به کار گرفته شده در این پایان نامه را نشان می دهد. توان موردنیاز برای به حرکت درآوردن خودرو از طریق موتور الکتریکی سه فاز آسنکرون تأمین می شود. موتورهای القایی AC پرکاربردترین موتورهایی هستند که در سامانه های کنترل حرکت صنعتی و همچنین خانگی به کار گرفته می شوند. طراحی ساده و پایدار، بهای ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان و کامل به یک سرچشمه نیروی AC برتری های بنیادی موتورهای القایی AC هستند. با اینکه طراحی موتورهای AC آسان تر از موتورهای DC است، ولی کنترل سرعت و گشتاور در انواع مختلف موتورهای القایی AC نیازمند دریافتی ژرف تر در طراحی و ساخت این نوع موتورها هست. از مبدل DC-DC برای تنظیم ولتاژ خروجی پیل سوختی و همچنین از یک اینورتر جهت تبدیل جریان DC خروجی از پیل سوختی به جریان AC و اتصال مجموعه باتری و پیل سوختی به موتور الکتریکی استفاده شده است. انرژی لازم برای به حرکت درآوردن خودرو توسط پیل سوختی و باتری تأمین می شود.



شکل (۳-۱): ساختار خودروی برقی پیل سوختی/باتری

گونه‌های مختلفی از باتری‌ها در خودروهای برقی می‌توانند استفاده شوند که شامل: باتری سرب اسیدی، باتری هایبیرید نیکل-فلز، باتری نیکل-کادمیم و باتری لیتیم یونی^{۳۳} می‌باشند. در این بین باتری‌های لیتیم یونی به سبب دارا بودن بالاترین چگالی انرژی، طول عمر زیاد، ولتاژ بالاتر و عدم آلودگی ترجیح داده می‌شوند [۲۱].

۳-۲- ارتباط بین عملکرد خودرو و پارامترهای انتقال توان

در بررسی عملکرد یک خودروی هایبیرید پیل سوختی ایمنی، طول عمر، کم‌مصرف بودن و ... مهم می‌باشند. در این پایان‌نامه جهت بررسی عملکرد خودرو فاکتورهایی نظیر: حداکثر سرعت، زمان شتاب صفر تا یک سرعت معین، حداکثر مسافت طی شونده توسط خودرو تحت شرایط خاص، حداکثر شیب بالارونده خودرو در یک سرعت خاص و میزان هیدروژن مصرفی خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این خودروها موتور الکتریکی برای به حرکت درآوردن خودرو باید بتواند بر نیروهای نظیر: مقاومت چرخ‌ها، مقاومت هوا و نیروی مقاومت شتاب غلبه کند. بنابراین معادله‌ی دینامیکی خودرو را به صورت زیر می‌توان نوشت. [۲۰]

$$mgfvcos\alpha + 0.5C_d A \rho v^3 + \delta mv \frac{dv}{dt} + mgv \sin\alpha = p_m \eta_T \eta_{md} \quad (۱-۳)$$

در این معادله m جرم خودرو که شامل جرم پیل سوختی، باتری، موتور الکتریکی و دیگر اجزا خودرو می‌باشد. g شتاب گرانش زمین، f ضریب مقاومت غلتشی، v سرعت خودرو، α زاویه مسیر بالارونده، C_d ضریب اصطکاک هوا، A مساحت قسمت بادخور جلویی خودرو، δ ضریب تصحیح چرخشی، ρ چگالی هوا، p_m توان الکتریکی تحویلی از اینورتر به موتور، η_T راندمان انتقال و η_{md} راندمان موتور الکتریکی می‌باشند. علاوه بر این معادله‌ی مربوط به تعادل توان در انتقال توان هایبیرید نیز به صورت زیر می‌باشد.

^{۳۳} Lithium-ion battery

$$P_m + P_{aux} = P_{fc} \eta_{dc} + P_{bat} \quad (2-3)$$

که P_{aux} توان جانبی (توان مربوط به سیستم تهویه، کولر و سیستم فرمان الکتریکی)، P_{fc} توان خالص خروجی از پیل سوختی، P_{bat} توان خروجی از باتری و η_{dc} راندمان مبدل DC-DC می‌باشد. در بخش‌های بعدی با استفاده از معادله‌های (1-3) و (2-3) می‌توانیم معادلات مربوط به بررسی عملکرد متغیرهای خودرو را استخراج کنیم.

3-2-1- حداکثر سرعت (v_{max})

حداکثر سرعت برای یک خودرو در جاده‌های صاف ($\alpha=0$) محاسبه می‌شود؛ و همچنین در این سرعت $\frac{dv_{max}}{dt} = 0$ هست. از معادله (1-3) داریم:

$$2mgfv_{max} + C_d A \rho v_{max}^3 - 2P_{m-max} \eta_T \eta_{md} = 0 \quad (3-3)$$

که v_{max} حداکثر سرعت و P_{m-max} حداکثر توان تحویلی از اینورتر به موتور می‌باشد. معادله (3-3) یک معادله درجه سه استاندارد هست که با حل معادله داریم:

$$v_{max} = \left[\sqrt{p^2 + \frac{8}{27}q^3} + p \right]^{\frac{1}{3}} - \left[\sqrt{p^2 + \frac{8}{27}q^3} - p \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4-3)$$

که در این معادله p و q دو متغیر دلخواه می‌باشند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} p = (P_{m-max} \eta_T \eta_{md}) / (C_d A \rho) \\ q = (mgf) / (C_d A \rho) \end{cases} \quad (5-3)$$

حداکثر توان الکتریکی ورودی به موتور الکتریکی به قابلیت توان دهی باتری و پیل سوختی و همچنین به توان موتور الکتریکی بستگی دارد. از این رو با استفاده از رابطه (6-3) می‌توان مقدار

P_{m-max} را محاسبه نمود. [20]

$$P_{m-\max} = \min \left(p_{m-\max \text{ allowed}} \cdot P_{fc-\max} \eta_{dc} + v_{\min} (v_{ocv} - v_{\min}) / R_{bat} - p_{aux} \right) \quad (6-3)$$

$P_{m-\max \text{ allowed}}$ حداکثر توان الکتریکی مجاز ورودی به موتور الکتریکی هست و به مشخصات داخلی موتور الکتریکی که به صورت تابعی از سرعت دورانی موتور می باشد، بستگی دارد. $P_{fc-\max}$ حداکثر توان خالص خروجی از پیل سوختی و η_{dc} نیز راندمان مبدل DC-DC می باشد. ولتاژ مدارباز باتری هست که بر اساس حالت شارژ باتری و دمای باتری معمولاً محاسبه می شود. v_{\min} حداقل مقدار مجاز سطح ولتاژ باتری می باشد و بر اساس مشخصات الکتروشیمیایی باتری مشخص می شود. R_{bat} نیز مقدار متوسط مقاومت دشارژ باتری می باشد، معمولاً به وسیله منحنی حالت شارژ باتری به دست می آید.

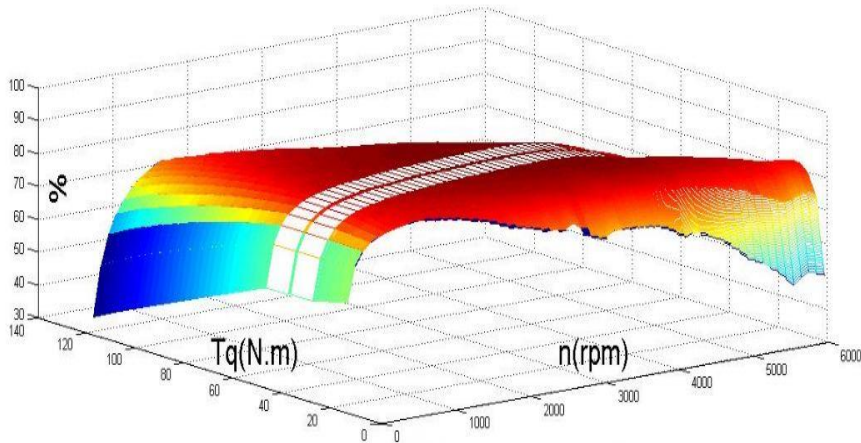
۳-۲-۲- زمان شتاب (t_{11})

معمولاً زمان شتاب یک خودرو را معیاری برای ارزیابی قابلیت شتاب گیری خودرو می دانند. زمان شتاب را به صورت مدت زمانی که طول می کشد تا سرعت خودرو از سرعت صفر به سرعت معین v_1 برسد، تعریف می کنند. همانند محاسبه حداکثر سرعت، زمان شتاب را نیز در جاده های صاف محاسبه می کنند. در حین شتاب گیری خودرو، سرعت لحظه ای به صورت زیر محاسبه می شود: [۲۰]

$$\begin{cases} v(k) = F(k) \frac{\Delta t}{\delta m} + v(k-1) \\ v(0) = 0 \\ F(k) = T_{m-\max}(k) i_g i_0 \frac{\eta_r}{r} - mgf - 0.5 C_D A \rho v(k-1)^2 \\ T_{m-\max}(k) = \min(T_{m-\max \text{ allowed}}, P_{m-\max}(k) \frac{\eta_{md}}{\omega(k)}) \end{cases} \quad (7-3)$$

در معادله (۷-۳)، F نیروی رانش، Δt زمان ثابت و معین، K اندیس تعداد دفعات، ω سرعت دورانی موتور الکتریکی، r شعاع چرخ خودرو، i_g بهره انتقال اصلی، i_0 بهره انتقال جعبه دنده و $T_{m-\max}$

حداکثر گشتاور موتور الکتریکی که به منحنی مشخصه موتور الکتریکی (شکل (۳-۲)) بستگی دارد و حداکثر مقدار گشتاور در این منحنی مشخصه، $T_{m-max-allowed}$ می باشد [۲۲]. زمان شتاب نیز به صورت $t_u = N \Delta t$ محاسبه می شود. که اندیس N به صورت $N = \min k$ تعریف می شود، وقتی سرعت لحظه ای $v(k)$ بیشتر از سرعت معین v_1 شود.



شکل (۳-۲): راندمان موتور بر حسب گشتاور و سرعت

۳-۲-۳- حداکثر شیب بالارونده (α_{max})

از آنجایی که خودروها با سرعت بسیار کمی به حداکثر شیب صعود خود می رسند پس $\frac{dv}{dt} = 0$ و

$v^3 \rightarrow 0$ می باشند. از معادله ی (۳-۱) و قیود بالا خواهیم داشت:

$$f \cos \alpha + \sin \alpha = T_{m-max} i_g i_0 \eta_T / (mgr) \quad (۸-۳)$$

با حل معادله (۸) حداکثر شیب صعود بر حسب درجه را می توان به صورت زیر نشان داد:

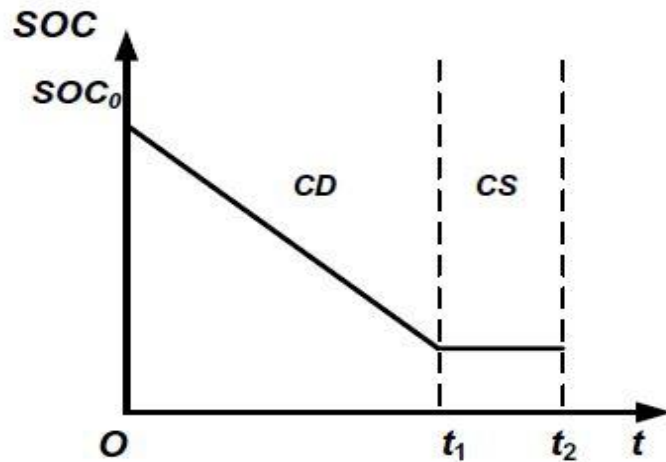
$$\alpha_{max} = \arcsin \left(T_{m-max} i_g i_0 \eta_T / (mgr \sqrt{f^2 + 1}) \right) - \arcsin \left(T_{m-max} i_g i_0 \eta_T f / (mgr \sqrt{f^2 + 1}) \right) \quad (۹-۳)$$

۳-۲-۴- استراتژی مدیریت انرژی

در خودروهای هایبریدی برای افزایش راندمان، لازم است علاوه بر بهینه‌سازی اجزا ساختاری خودرو به استراتژی مدیریت انرژی نیز پرداخته شود. آنچه در یک خودروی هایبریدی بسیار حائز اهمیت است چگونگی تقسیم توان بین اجزا اصلی زنجیره توان است تا خودرو در هر لحظه بالاترین راندمان را داشته باشد. این شیوه تقسیم توان تحت عنوان استراتژی مدیریت انرژی و یا استراتژی کنترل خودروی هایبریدی شناخته می‌شود. در این نوع ساختار به کار گرفته شده برای خودروی هایبریدی چگونگی تقسیم توان موردنیاز موتور الکتریکی، بین باتری و پیل سوختی به‌عنوان یک مشکل اساسی مطرح هست. که برای رفع این مشکل باید از یک استراتژی مدیریت انرژی مناسب استفاده گردد. استراتژی‌هایی مانند استراتژی بهینه آنی [۲۳]، استراتژی بهینه عام [۲۴]، استراتژی تبدیل موجک [۲۵] و استراتژی مدیریت انرژی بر اساس فرکانس متغیر [۲۶] روش‌هایی هستند که مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین استراتژی ترکیبی CDCS به عنوان پرفرودارترین نوع استراتژی‌ها مطرح می‌باشد. هدف از استراتژی ترکیبی کمینه کردن هزینه بهره‌برداری در خودروهای هایبریدی می‌باشد. در استراتژی که در این پایان‌نامه نیز از آن استفاده شده است با استفاده از وضعیت شارژ باتری حالت کاری باتری را به دو قسمت $CD^{۳۴}$ و $CS^{۳۵}$ تقسیم می‌کنیم. شکل شماره (۳-۳) نمودار مربوط به حالت شارژ باتری و استراتژی ترکیبی را نشان می‌دهد. در حالت اول خودرو می‌تواند در هر دو حالت هایبرید یا باتری کار کند؛ اما در حالت دوم خودرو فقط از توان پیل استفاده می‌کند و باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در معادلات مربوط به مصرف انرژی تفاوتی ایجاد نمی‌شود در حالت اول فرض می‌شود که پیل سوختی خاموش و خودرو فقط از باتری استفاده می‌کند.

^{۳۴} Charge sustaining

^{۳۵} Charge depleting



شکل (۳-۳): استراتژی CDCS

۳-۲-۵- حداکثر مسافت طی شونده تحت سرعت ثابت (L)

با توجه به استراتژی مدیریت انرژی به کار گرفته شده در این پایان نامه، حرکت خودرو را در دو مرحله در نظر می گیریم؛ یعنی فرض می کنیم در یک مرحله خودرو فقط از توان پیل سوختی استفاده می کند و در مرحله بعد پیل خاموش شده و باتری تمام توان موردنیاز را تأمین می کند. به همین ترتیب در مرحله اول مسافت L_1 یعنی مسافت طی شونده توسط توان تحویلی از پیل سوختی به صورت زیر محاسبه می شود: [۲۰]

$$\begin{cases} L_1 = (E_{fc} \eta_{dc} - E_{aux}) \frac{\eta_T \eta_{md}}{mgf + 0.5C_D A \rho V_0^2} \\ E_{fc} = m_{hydro} LHV \eta_{fc} \end{cases} \quad (۳-۱۰)$$

که E_{fc} انرژی خالص خروجی از پیل سوختی، η_{dc} راندمان مبدل DC-DC، E_{aux} انرژی مصرف شده توسط اجزای جانبی خودرو، m_{hydro} جرم هیدروژن ذخیره شده در مخزن مخصوص، LHV کمترین حرارت هیدروژن درون مخزن^{۳۶}، η_{fc} راندمان سیستم پیل سوختی و V_0 سرعت ثابت در طول حرکت خودرو می باشد. در مرحله دوم یعنی با فرض اینکه تمام توان از باتری تأمین شود مسافت

^{۳۶} Low heat value of hydrogen

L_2 نیز به همین روش محاسبه می‌شود. اگر E_{bat} انرژی ذخیره‌شده در باتری و η_{bat} راندمان دشارژ باتری باشد. مسافت L_2 به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L_2 = (E_{bat} \eta_{bat} - E_{aux}) \frac{\eta_T \eta_{md}}{mgf + 0.5C_D A \rho V_0^2} \quad (11-3)$$

مسافت کلی طی شده در دو مرحله نیز به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$L = L_1 + L_2 \quad (12-3)$$

۳-۲-۶- هیدروژن مصرفی

با توجه به فرض در نظر گرفته‌شده در شکل (۳-۳) در مورد استراتژی مدیریت انرژی، هیدروژن فقط در مرحله CS مصرف می‌شود. در تعیین میزان مصرف، هیدروژن مصرف‌شده در طی مسافت ۱۰۰ کیلومتر در مرحله CS در یک سیکل دلخواه را اندازه‌گیری می‌کنند. از [۲۷] میزان انرژی مصرف‌شده از هیدروژن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_{hydro} = \left(\frac{E_{md}}{\eta_{md}} + E_{aux} + E_{batloss} - E_{mb} \eta_{mb} \right) / \eta_{fc} \eta_{dc} \quad (13-3)$$

که E_{md} انرژی مکانیکی استفاده‌شده موتور الکتریکی برای حرکت خودرو، $E_{batloss}$ انرژی اتلافی در حین شارژ/دشارژ باتری، E_{mb} انرژی مکانیکی حاصل از بازیافت انرژی حاصل از ترمز و η_{mb} راندمان بازیافت انرژی ترمز گیری موتور الکتریکی می‌باشد. جرم هیدروژن مصرفی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$m_{hydro} = \frac{E_{hydro}}{LHV} \quad (14-3)$$

۳-۳- تعریف مسئله

مسئله بهینه‌سازی در این پایان‌نامه در واقع طراحی یک خودروی هایبریدی پیل سوختی/باتری می‌باشد. به‌گونه‌ای که تمام ملزومات موردنیاز برای یک خودرو خانوادگی برای سفرهای شهری و بین‌شهری را برآورده سازد، و درعین‌حال هزینه کلی سیستم حداقل شود. عملکرد خودرو: نظیر حداکثر سرعت، زمان شتاب صفر، حداکثر مسافت طی شونده توسط خودرو تحت شرایط خاص و میزان هیدروژن مصرفی یک خودرو برقی پیل سوختی تحت تأثیر شش پارامتر یعنی: حداکثر توان پیل سوختی (P_{fc-max})، راندمان سیستم پیل سوختی (η_{fc})، هیدروژن ذخیره‌شده (m_{hydro})، مقاومت متوسط باتری (R_{bat})، ظرفیت باتری (C_{bat}) و توان جانبی خودرو (P_{aux}) می‌باشد. از بین شش پارامتر مطرح‌شده، دو پارامتر یعنی راندمان پیل سوختی و توان جانبی خودرو مقادیر مشخصی دارند. یعنی راندمان سیستم پیل سوختی، برحسب نوع شرکت سازنده پیل و مدل آن همواره چیزی در حدود ۵۰-۵۵٪ می‌باشد و توان جانبی با توجه به نوع سیستم تهویه و فرمان الکتریکی به‌صورت یک مقدار ثابت بیان می‌شوند. تعداد پارامترهای مسئله به چهار پارامتر کاهش می‌یابد که در این بین با توجه به معادله (۳-۱۱) و رابطه زیر متوجه می‌شویم که متغیر R_{bat} تابعی از C_{bat} می‌باشد.

$$\begin{cases} R_{bat} = D \frac{V_{ocv}}{C_{bat}} \\ D = R_{cell} \frac{C_{cell}}{V_{ocvcell}} \end{cases} \quad (۳-۱۵)$$

که در این رابطه D به‌عنوان یک پارامتر که برحسب خواص سلول باتری به دست می‌آید، تعریف شده است. در نتیجه به یک مسئله بهینه‌سازی با سه متغیر مستقل یعنی: ظرفیت باتری (C_{bat})، جرم هیدروژن ذخیره‌شده (m_{hydro}) و حداکثر توان خروجی پیل سوختی (P_{fc-max}) خواهیم رسید که به‌صورت (۳-۱۶) تعریف می‌شود.

$$\min_x \left(\begin{cases} \text{cost}_{sys} = \text{cost}_{fix} + \text{cost}_{ope} \\ \text{cost}_{fix} = k_1 P_{fc \max} + k_2 C_{bat} V_{ocv} \\ \text{cost}_{ope} = k_3 N_1 C_{bat} V_{ocv} \Delta SOC \eta_{grid} + k_4 N_2 m_{hydro} \eta_{ref} \end{cases} \right)$$

$$S.t \begin{cases} v_{\max} \geq 120 kmh^{-1} \\ t_u \leq 6s \\ L \geq 300km \end{cases} \quad (16-3)$$

که cost_{sys} هزینه کلی می‌باشد و باید کمینه شود، cost_{fix} هزینه ثابت پیل و باتری، cost_{ope} هزینه نگهداری از دو منبع توان در طول عمر خودرو، k_1 هزینه متوسط سیستم پیل سوختی، k_2 هزینه متوسط سیستم باتری، k_3 قیمت برق شبکه، k_4 قیمت هیدروژن پالایش شده، ΔSOC تغییرات مجاز میزان شارژ باتری بر اساس استراتژی تعیین شده، ضریب N_1 و N_2 به ترتیب مربوط به تعداد دفعات شارژ باتری از شبکه و تعداد دفعات پر شدن مخزن هیدروژن در کل طول عمر خودرو و بردار $x = (P_{fc \max}, m_{hydro}, C_{bat})$ بردار متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند.

در قیود مسئله فوق به موارد زیر اشاره شده است:

(۱) حداکثر سرعت خودرو باید بیش از $120 kmh^{-1}$ باشد.

(۲) زمان شتاب خودرو یعنی مدت زمانی که سرعت خودرو از $0 kmh^{-1}$ به $50 kmh^{-1}$ می‌رسد باید کمتر از $6s$ باشد.

(۳) مسافت طی شونده توسط خودرو با یکبار سوخت‌گیری کامل باتری و هیدروژن، باید بیش از $300 km$ باشد.

همان طوری که مطرح شد در این پایان‌نامه از استراتژی مدیریت انرژی موسوم به CDCS استفاده شده است. در مود کاری CD، انرژی لازم برای به حرکت درآوردن خودرو توسط باتری تأمین می‌شود. در معادله‌ی مربوط به تابع هدف مسئله بهینه‌سازی قسمت اول تابع مربوط به هزینه نگهداری سیستم (

$cost_{ope}$) مربوط به هزینه الکتریکی باتری می‌باشد. در مورد کاری CS باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد و اگرچه در بعضی از شرایط باتری توان موردنیاز برای اتفاقات دینامیکی گذرا را فراهم می‌کند ولی متوسط توان خروجی از باتری تقریباً برابر با صفر است. در این مورد تنها از پیل سوختی برای تأمین انرژی خودرو استفاده می‌شود؛ بنابراین قسمت دوم مربوط به $cost_{ope}$ به هزینه گاز هیدروژن مصرف‌شده در مورد CS در کل طول عمر خودرو می‌باشد. در رابطه هزینه نگهداری با این فرض که بخواهیم با توجه به استاندارد اروپا مدت ۵ سال از خودور استفاده کنیم ضرایب k_3 و k_4 مقادیر متوسط سالانه قیمت برق شبکه و قیمت هیدروژن می‌باشند و مقادیر آن‌ها از [۲۸] در جدول (۳-۱) آورده شده است.

جدول (۳-۱): مقادیر ضرایب k_3 و k_4 طی ۵ سال گذشته

	2009	2010	2011	2012	2013
$k_3 (\$/kwh)$	0.04	0.0489	0.0464	0.0359	0.0561
$k_4 (\$/kg)$	3.8	3.6	3.5	3.2	3.2

فصل چهارم:

بررسی عملکرد خودرو هایبرید پیل سوختی

متصل به شبکه و بهینه‌سازی منابع تغذیه

۴-۱- تأثیر پارامترهای انتقال توان بر روی عملکرد خودرو

عملکرد یک خودرو الکتریکی هایبرید پیل سوختی به صورت کلی تحت تأثیر پارامترهایی نظیر ظرفیت باتری (C_{bat})، مقاومت الکتریکی باتری (R_{bat})، حداکثر توان پیل سوختی (P_{fc-max})، راندمان پیل سوختی (η_{fc})، جرم هیدروژن مخزن (m_{hydro}) و توان جانبی (p_{aux}) قرار می‌گیرد. جرم یک خودرو هایبریدی شامل جرم تمام اجزا خودرو از جمله پیل سوختی، باتری و موتور الکتریکی می‌باشد. با در نظر گرفتن این نکات خواهیم داشت:

$$m = m_0 + p_{fc-max} / p_1 + E_{bat} / p_2 \quad (1-4)$$

که در این رابطه m_0 جرم کلی خودرو بدون در نظر گرفتن پیل سوختی و باتری، p_1 نسبت توان به وزن سیستم پیل سوختی (0.157 kw/kg)، p_2 انرژی مخصوص پکیج باتری (70 wh/kg) و E_{bat} نیز انرژی الکتریکی موجود در پکیج باتری می‌باشد. با افزایش حداکثر توان خروجی پیل سوختی و ظرفیت باتری بر جرم کلی خودرو نیز افزوده می‌شود که در واقع یک تأثیر منفی بر عملکرد خودرو خواهد داشت. برای نشان دادن تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد خودرو، از یک خودرو با مشخصات خودرو سواری پرآید از جدول شماره (۴-۱) استفاده کرده‌ایم.

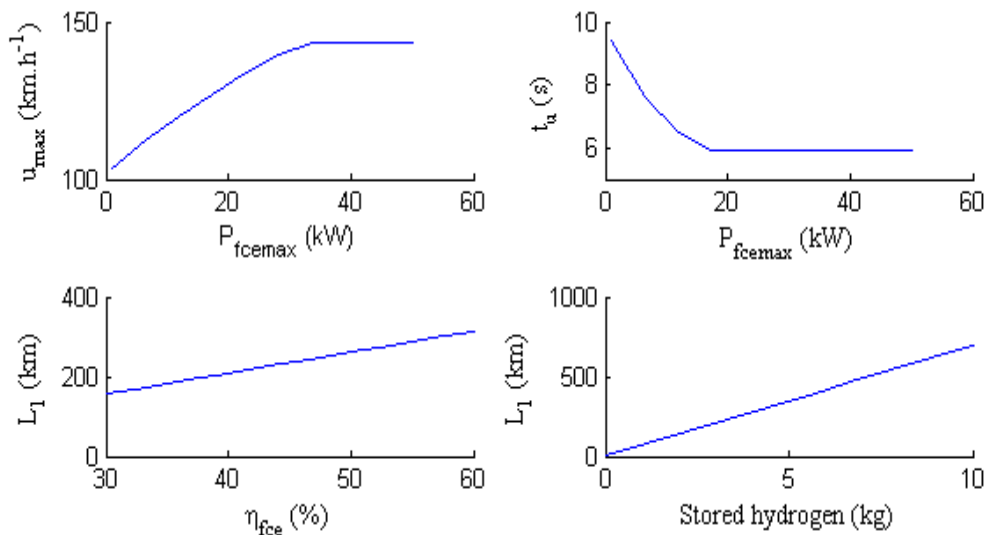
جدول (۴-۱): پارامترهای خودرو سواری پرآید

پارامتر	واحد	مقدار
m	kg	1024
g	m/s^2	9.8
f	-	0.015
C_d	-	0.41
A	m^2	1.8
δ	-	1.1
η_r	%	93
η_{md}	%	85
ρ	kg/m^3	1.29

۴-۱-۱- تأثیر پارامترهای مربوط به پیل سوختی (m_{hydro} و P_{fc-max} ، η_{fc})

در شکل (۴-۱) نحوه تأثیر پارامترهای پیل سوختی بر روی عملکرد خودرو نشان داده شده است. حداکثر سرعت خودرو با افزایش حداکثر توان پیل سوختی افزایش می‌یابد و این افزایش با شیب 1.22 $km(h\ kw)^{-1}$ تا حداکثر توان پیل سوختی برابر با 33 kw ادامه می‌یابد. در این توان، حداکثر سرعت به 145 km/h می‌رسد. در توان خروجی پیل سوختی بیش از 33 kw حداکثر سرعت با شیب بسیار ناچیزی شروع به کاهش می‌کند و دلیل این اتفاق افزایش وزن کلی خودرو می‌باشد درحالی‌که توان خروجی موتور الکتریکی ثابت می‌ماند.

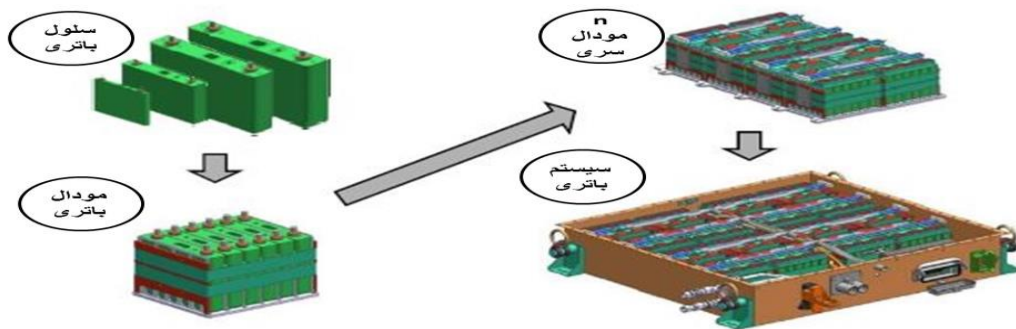
در بررسی نمودار مربوط به زمان شتاب (زمان رسیدن سرعت از 0 تا 50 km/h) مشاهده می‌شود که زمان شتاب با افزایش توان پیل با شیب $-0.13s\ kw^{-1}$ کاهش می‌یابد اما به همان دلیل مربوط به حداکثر سرعت در توان بیش از 23 kw زمان شتاب نیز با شیب بسیار ناچیزی شروع به افزایش می‌کند. همچنین مسافت طی شونده خودرو توسط توان حاصل از پیل سوختی L_1 به صورت خطی با افزایش راندمان پیل و جرم هیدروژن ذخیره‌شده پیل افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۱): تأثیر پارامترهای پیل سوختی بر روی عملکرد خودرو

۴-۱-۲- پارامترهای مربوط به باتری (R_{bat} و C_{bat})

در میان گونه‌های مختلف باتری مورد استفاده (سرب اسیدی، هایبرید نیکل-فلز، نیکل-کادمیم) در خودروهای برقی باتری‌های لیتیم-یونی به سبب دارا بودن بالاترین چگالی انرژی، طول عمر زیاد، ولتاژ بالاتر و عدم آلودگی ترجیح داده می‌شوند.



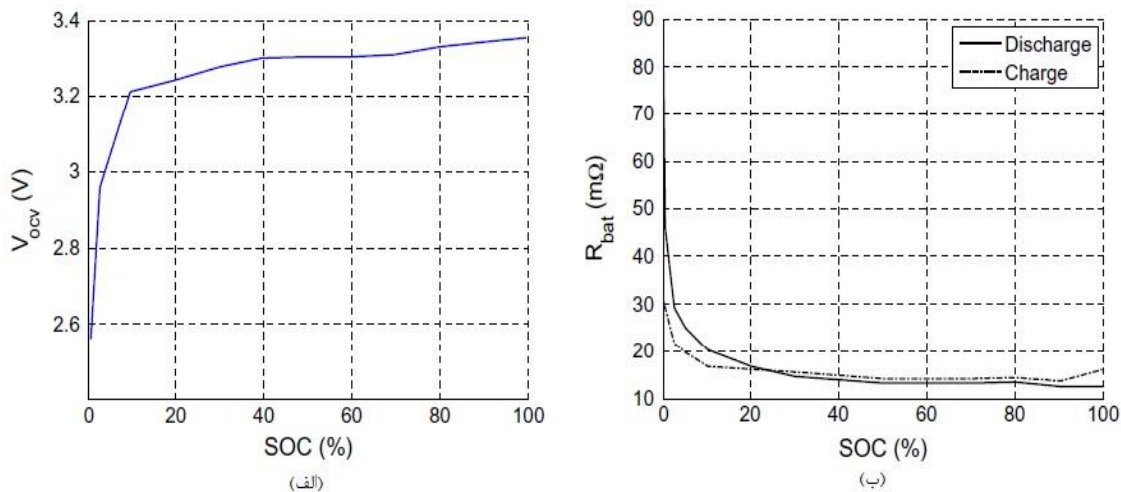
شکل (۲-۴): سیستم باتری خودرو

در سیستم مربوط به باتری خودرو فرض می‌کنیم که باتری از n ماژول سری متصل شده به یکدیگر تشکیل شده است [۶] و هر ماژول دارای m سلول موازی متصل شده به هم می‌باشد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{cases} C_{bat} = \frac{m}{n} C_{cell} \\ R_{bat} = \frac{n}{m} R_{cell} \\ V_{ocv} = n V_{ocvcell} \end{cases} \quad (2-4)$$

که C_{bat} ظرفیت باتری، R_{bat} میانگین مقاومت باتری، V_{ocv} ولتاژ مدار باز باتری، C_{cell} ظرفیت هر سلول باتری، R_{cell} مقاومت هر سلول باتری و $V_{ocvcell}$ ولتاژ مدار باز هر سلول باتری می‌باشد. عملکرد هر باتری طبق معادله (۲-۴) بر اساس سه پارامتر مشخص می‌شود؛ که در این بین ولتاژ مدار باز تحت تأثیر دو عامل محدود می‌شود؛ یعنی اگر این ولتاژ بالا باشد تلفات سیستم به دلیل کم شدن جریان کاهش

می‌یابد و از طرفی بالا رفتن سطح ولتاژ سبب استفاده از ابزار الکترونیکی با قیمت بالاتری جهت بالا بردن ایمنی و قابلیت اطمینان می‌شود؛ که به خاطر مسائل مربوط به هزینه و راندمان سیستم از ابتدا ولتاژ مدارباز تعیین می‌شود. بنابراین برای یک خودرو عملکرد خودرو تحت تأثیر دو پارامتر قرار می‌گیرد. ظرفیت و مقاومت متوسط باتری که هر دو پارامتر به دلیل اینکه باتری با گذشت زمان دچار تخریب می‌شود [۷] متغیر می‌باشند و به‌مرور زمان باتری دچار کاهش ظرفیت و افزایش مقاومت می‌شود. انواع مختلفی از باتری‌های لیتیم یونی مانند: $\text{Li}(\text{NiCo})\text{O}_2$, LiMn_2O_4 , LiCoO_2 , LiFePO_4 موجود می‌باشند. عموماً در خودروهای برقی از باتری‌های لیتیم یونی LiFePO_4 به دلیل ایمنی و طول عمر بیشتر استفاده می‌کنند. در شکل شماره (۴-۳-الف) ارتباط بین ولتاژ مدارباز و SOC یک سلول باتری LiFePO_4 با ظرفیت 11 A.h نشان داده شده است. همچنین در شکل شماره (۴-۳-ب) ارتباط بین مقاومت شارژ و دشارژ باتری با SOC باتری نشان داده شده است. از آنجایی که هم در حالت شارژ و هم در حالت دشارژ مقاومت باتری در محدوده $0.3 \leq \text{SOC} \leq 0.9$ ، $15\text{m}\Omega$ می‌باشد. بنابراین مقاومت متوسط هر سلول باتری را $15\text{m}\Omega$ در نظر می‌گیریم.



شکل (۴-۳): الف) منحنی تغییرات ولتاژ مدارباز و مقاومت باتری برحسب SOC [۲۰]

در شکل‌های شماره (۴-۴) و (۵-۴) نشان داده می‌شود که چگونه پارامترهای باتری بر روی عملکرد خودرو تأثیر می‌گذارند. در قسمت بالایی هر دو شکل تأثیر افزایش تعداد سلول‌های موازی باتری یا افزایش ظرفیت باتری بر عملکرد خودرو و در قسمت پایینی نیز تأثیر ایجاد تخریب در باتری و افزایش مقاومت باتری بر عملکرد خودرو به تصویر کشیده می‌شود. در واقع مقاومت متوسط باتری منعکس‌کننده درجه تخریب باتری بر اثر گذشت زمان می‌باشد. ظرفیت باتری با افزایش تعداد سلول‌های موازی باتری، افزایش داده می‌شود. یک باتری با ظرفیت بیشتر، توان بیشتری را نسبت به یک باتری با ظرفیت کم‌تر تحویل می‌دهد بنابراین افزایش ظرفیت باعث افزایش حداکثر سرعت و کاهش زمان شتاب خودرو می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۴) مشاهده می‌شود حداکثر سرعت، تقریباً به صورت خطی و با شیب $1.6 \text{ km.h}^{-2} \text{ A}^{-1}$ افزایش می‌یابد. برعکس این قضیه زمان شتاب به صورت غیرخطی دچار کاهش می‌شود. به‌عنوان مثال وقتی ظرفیت باتری 10A.h باشد زمان شتاب ۱۰ ثانیه می‌باشد و در ظرفیت‌های بیشتر زمان شتاب کاهش می‌یابد. اگر در یک خودرو برای ما زمان شتاب کمتر از ۱۰ ثانیه مطلوب باشد، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنیم ظرفیت باتری باید بیشتر از 18A.h باشد.

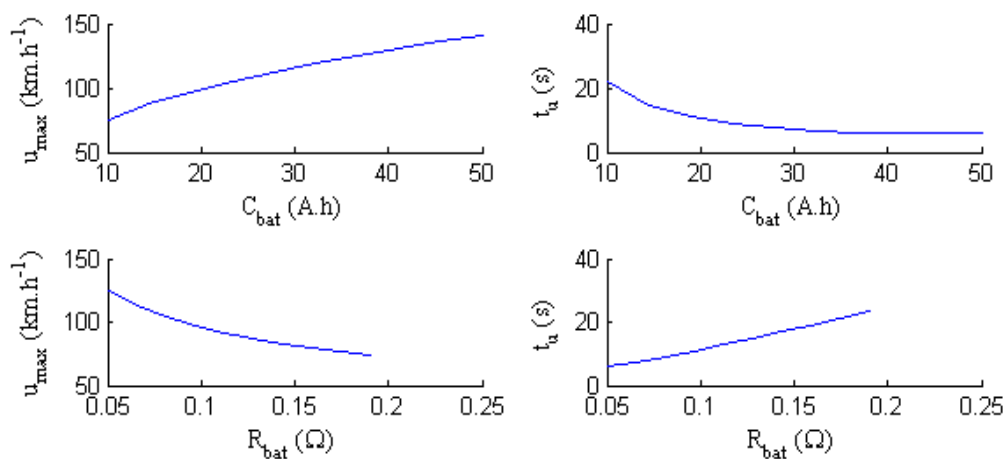
یک باتری با ظرفیت بیشتر، انرژی بیشتری را در خود ذخیره می‌کند. بنابراین همان‌طور که در شکل (۵-۴) نشان داده شده است. مسافت طی شونده توسط خودرو در حالت CD یعنی زمانی که فقط از باتری جهت حرکت خودرو استفاده می‌شود با افزایش ظرفیت باتری، با شیب تقریبی 0.8 km(Ah)^{-1} افزایش می‌یابد. مقاومت متوسط باتری با ایجاد تخریب در باتری بر اثر گذشت زمان افزایش می‌یابد. طبق مقاله [۲۸] افزایش مقاومت سطحی و مقاومت الکترولیت دلایل اصلی تلفات توان در باتری‌ها می‌باشند. مطالعه انجام‌شده در مقاله فوق تلفات توان برای یک سلول باتری LiFePO₄ بعد از ۶۰۰ سیکل کاری در دماهای 45,0,10 درجه به ترتیب در حدود 0%,61.6%,77.2% می‌باشد. در قسمت

پایین شکل (۴-۴) مشاهده می‌شود که اگر مقاومت متوسط باتری سه برابر شود، عملکرد توان خروجی باتری به مقدار $\frac{1}{3}$ خود می‌رسد. که یعنی تلفات توان 66.7% اتفاق افتاده است.

زمانی که مقاومت متوسط باتری افزایش می‌یابد. توان خروجی کاهش و تلفات انرژی افزایش می‌یابد که متعاقباً باعث کاهش مسافت طی شونده خودرو در حالت کاری CD می‌شود. علاوه بر موارد فوق افزایش مقاومت متوسط باتری باعث افزایش مصرف هیدروژن در خودرو نیز می‌شود؛ که از طریق رابطه زیر می‌توان این ارتباط را بیان نمود. [۲۰]

$$\frac{\Delta E_{hydro}}{E_{hydro}} = -NEC \Delta R_{bat} / (E_{hydro} R_{bat} \eta_{fce} \eta_{dc}) \quad (3-4)$$

در رابطه فوق NEC مصرف خالص برق از باتری می‌باشد که از یکپارچه‌سازی انرژی ورودی/خروجی از باتری در حین کار به دست می‌آید. اگر مقاومت متوسط باتری تا ۵۰٪ افزایش یابد، یک افزایش ۳.۴٪ در مصرف هیدروژن خودرو خواهیم داشت.

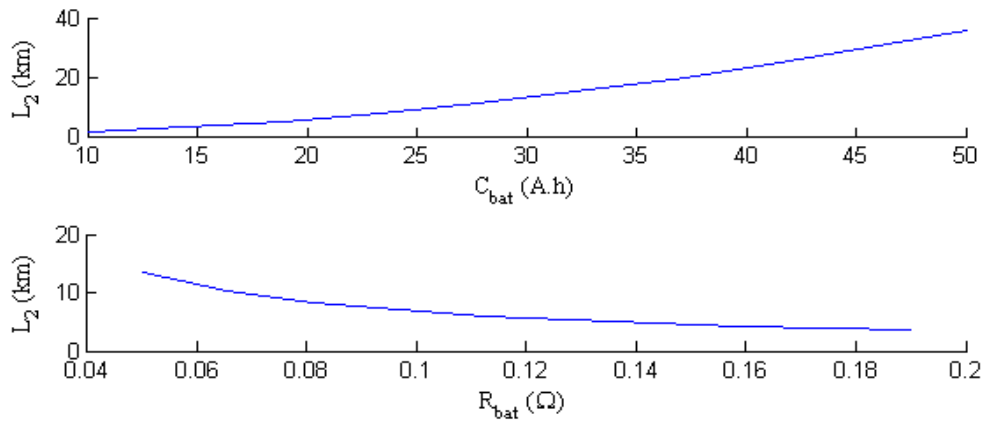


شکل (۴-۴): تأثیر ظرفیت و مقاومت باتری بر حداکثر سرعت و زمان شتاب

۴-۱-۳- توان جانبی

توان جانبی خودرو توان موردنیاز برای سیستم تهویه الکتریکی هوا و سیستم فرمان الکتریکی می‌باشد. در سیستم تهویه الکتریکی، انرژی الکتریکی موردنیاز، توسط باتری خودرو تأمین می‌شود؛

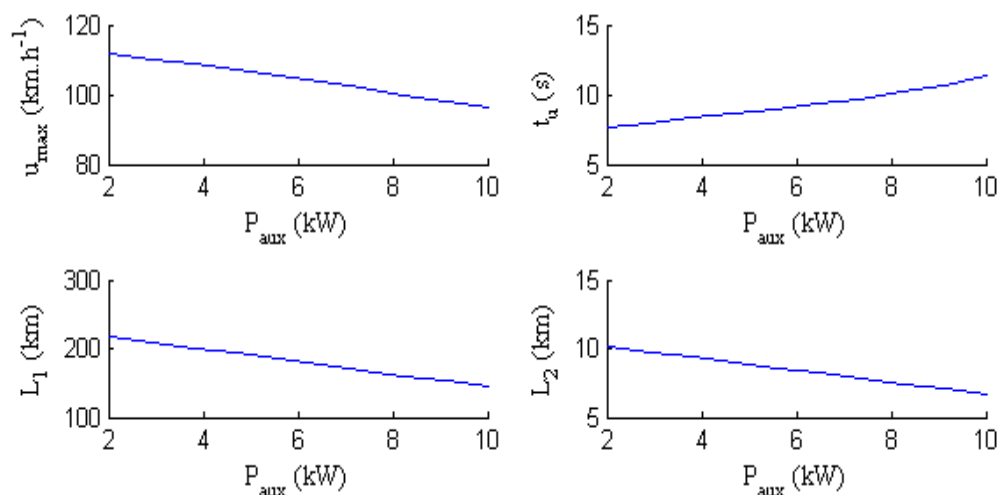
بنابراین سیستم تهویه الکتریکی مستقیماً از توان موتور استفاده نمی‌کند و بار اضافی بر موتور اعمال نمی‌کند و به همین دلیل سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود.



شکل (۴-۵): تأثیر ظرفیت و مقاومت باتری بر مسافت طی شونده

این سیستم بیشتر در خودروهای هایبریدی کاربرد دارد زیرا برای تأمین انرژی الکتریکی، تجهیزات بیشتری نسبت به خودروهای معمول دارد. سیستم فرمان الکتریکی نیز در بسیاری از خودروها، جایگزین سیستم فرمان هیدرولیکی شده است. سیستم فرمان هیدرولیکی از توان خودرو برای کارکرد خود استفاده می‌کند اما سیستم الکتریکی با استفاده از انرژی الکتریکی باتری خودرو که همیشه در حرکت شارژ می‌شود استفاده می‌کند به همین دلیل توان کمتری مصرف می‌کند و در نتیجه سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود. در شکل (۴-۶) تأثیر این توان بر عملکرد خودرو را می‌بینیم. مصرف توان جانبی تأثیر زیادی بر روی مصرف هیدروژن مصرفی خودرو دارد. ارتباط بین این دو کمیت را می‌توان با فرمول زیر نشان داد:

$$\Delta E_{hydro} / E_{hydro} = \Delta E_{aux} / (E_{hydro} \eta_{fce} \eta_{dc}) \quad (۴-۴)$$



شکل (۴-۶): تأثیر توان جانبی بر عملکرد خودرو

زمانی که مصرف توان جانبی افزایش می‌یابد، حداکثر سرعت و مسافت طی شونده توسط خودرو کاهش می‌یابند. درحالی‌که زمان شتاب افزایش می‌یابد. ارتباط بین پارامترها و مصرف توان جانبی تقریباً به صورت خطی می‌باشد و شیب مربوط به نمودار حداکثر سرعت، زمان شتاب و مسافت طی شونده در حالت کاری CS و CD به ترتیب $-0.625 \text{ km}(\text{h.kw})^{-1}$ ، $0.375 \text{ s}(\text{kw})^{-1}$ ، -7 km kw^{-1} و -0.5 km kw^{-1} می‌باشد.

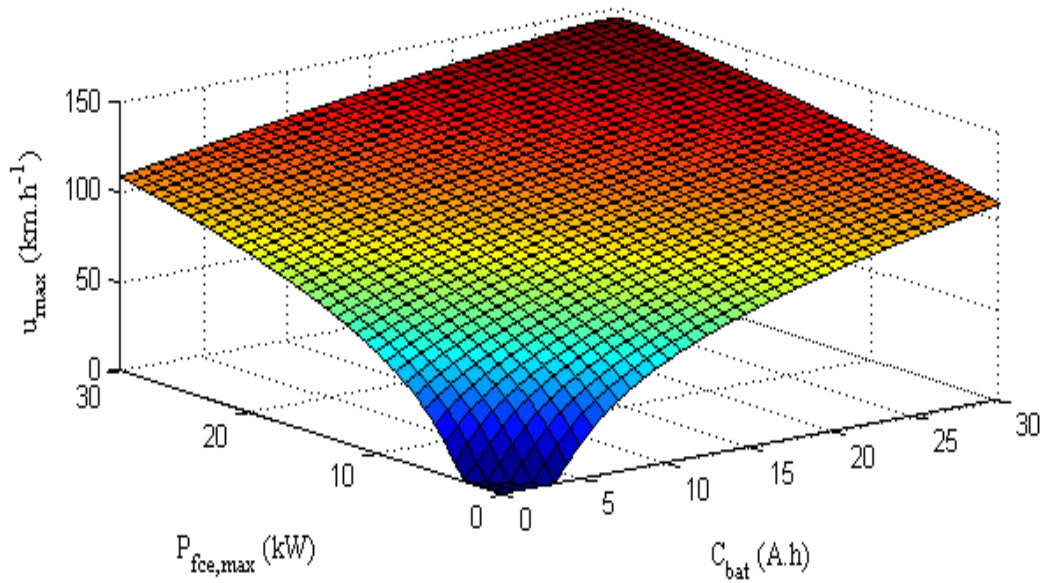
۴-۲- حل مساله بهینه‌سازی به روش مستقیم

مسئله (۳-۱۶) به گونه‌ای هست که قيود مسئله به صورت مستقیم در مسئله ظاهر نمی‌شوند. به همین دلیل با استفاده از روابط مطرح شده در فصل قبل می‌توانیم قيود را برحسب متغیرهای موجود در تابع هدف بازنویسی کنیم.

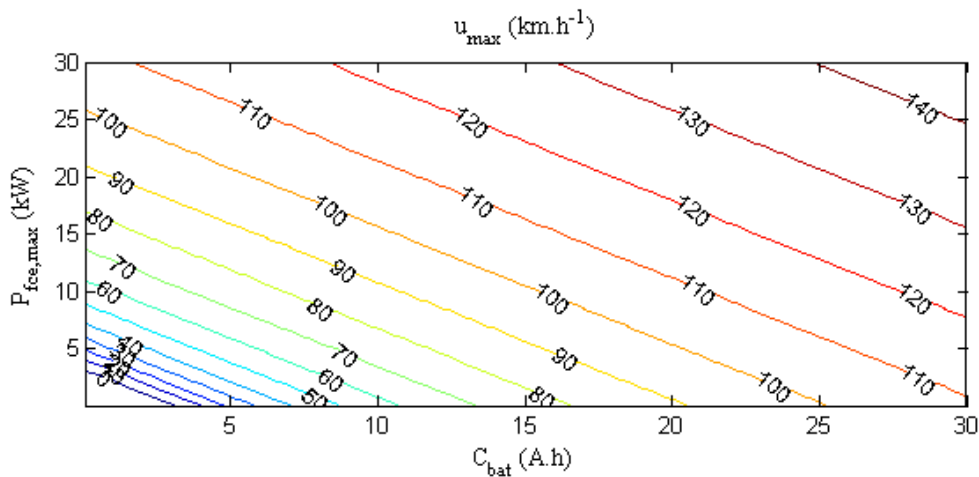
۴-۲-۱- حداکثر سرعت

از معادله‌های (۳-۴) و (۳-۶) متوجه می‌شویم که حداکثر سرعت خودرو تابعی از حداکثر توان خروجی پیل سوختی و ظرفیت باتری می‌باشد، $v_{\max} = f(p_{fce-\max}, c_{bat})$. نمودار مربوط به تابع

حداکثر سرعت در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. برای برقراری شرط $v_{\max} \geq 120 \text{ kmh}^{-1}$ همان-
 طور که در شکل (۸-۴) مشخص شده است، حداکثر توان پیل سوختی و ظرفیت باتری باید به ترتیب
 بیش از 10 kw و 9 A.h باشد.



شکل (۷-۴): نمودار سه‌بعدی تابع حداکثر سرعت برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری

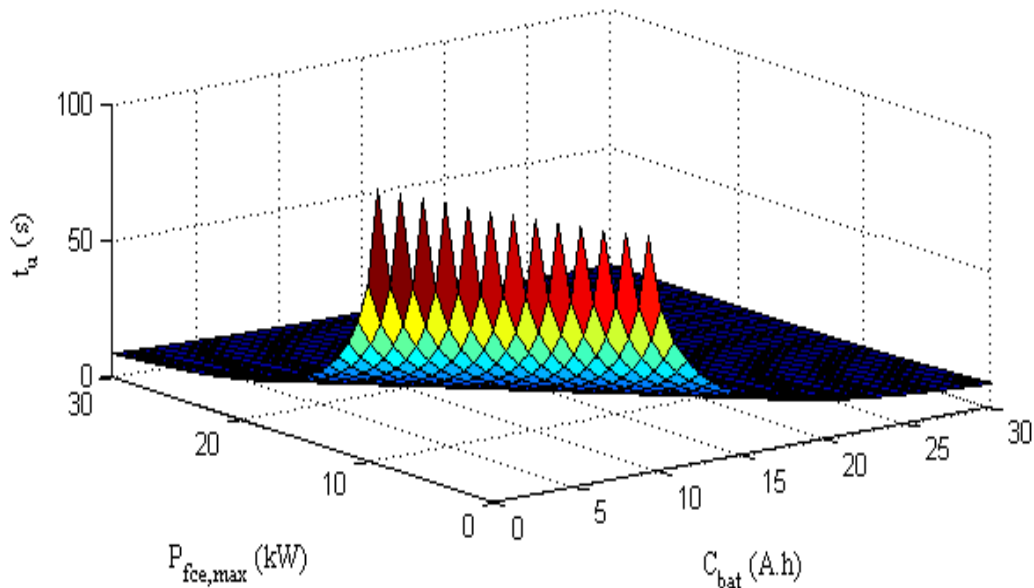


شکل (۸-۴): نمودار تابع حداکثر سرعت برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری

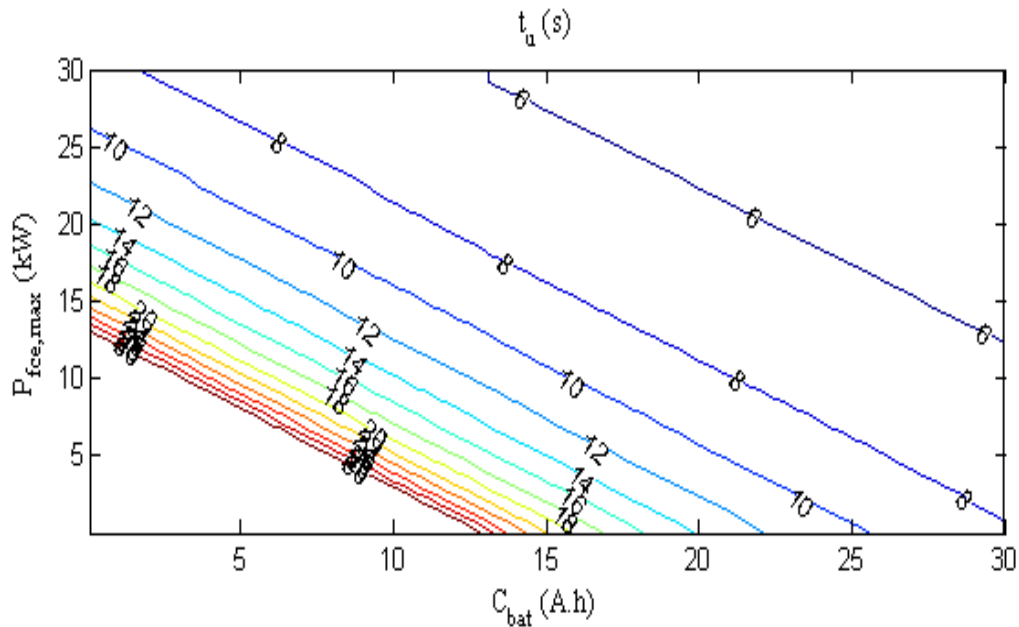
در شکل (۸-۴) مشاهده می‌کنیم زمانی که حداکثر سرعت $v_{\max} = 120 \text{ kmh}^{-1}$ یک رابطه خطی بین C_{bat} و $P_{fce-\max}$ برقرار می‌باشد.

۲-۲-۴- زمان شتاب

از معادلات شماره (۶-۳) و (۷-۳) متوجه می‌شویم که زمان شتاب از 0 km/h تا 50 km/h به صورت تابعی از حداکثر توان پیل سوختی و ظرفیت باتری می‌باشد، $t_u = g(p_{fce-\max}, C_{bat})$. نمودار مربوط به تابع زمان شتاب در شکل (۹-۴) نشان داده شده است. برای برقراری شرط $t_u \leq 6s$ همان‌طور که در شکل (۱۰-۴) نشان داده شده است، حداکثر توان پیل سوختی و ظرفیت باتری باید به ترتیب بیش از 15 kw و 15 A.h باشد.



شکل (۹-۴): نمودار سه‌بعدی تابع زمان شتاب برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری

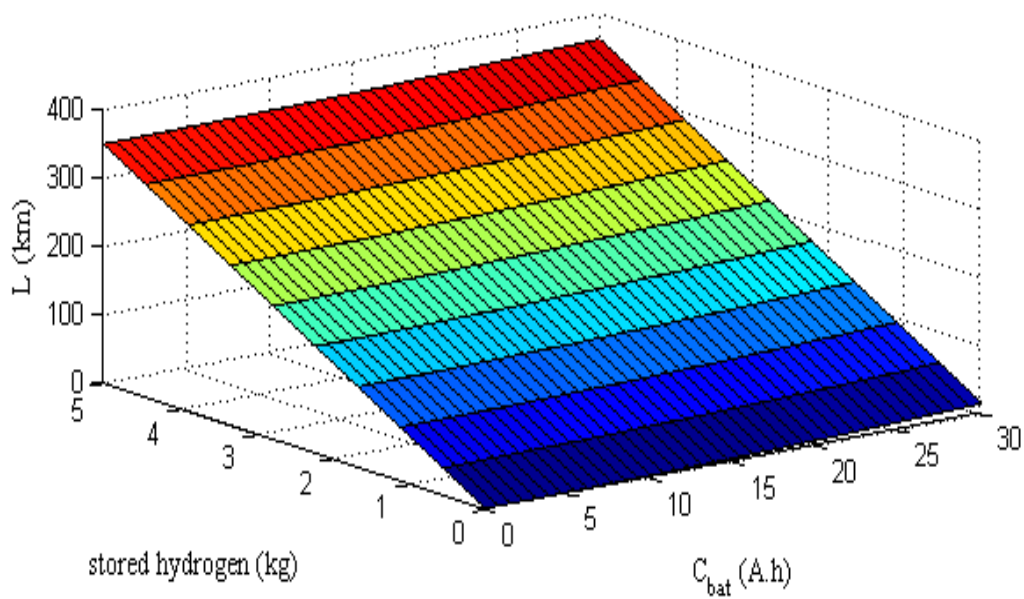


شکل (۴-۱۰): نمودار تابع زمان شتاب برحسب حداکثر توان پیل و ظرفیت باتری

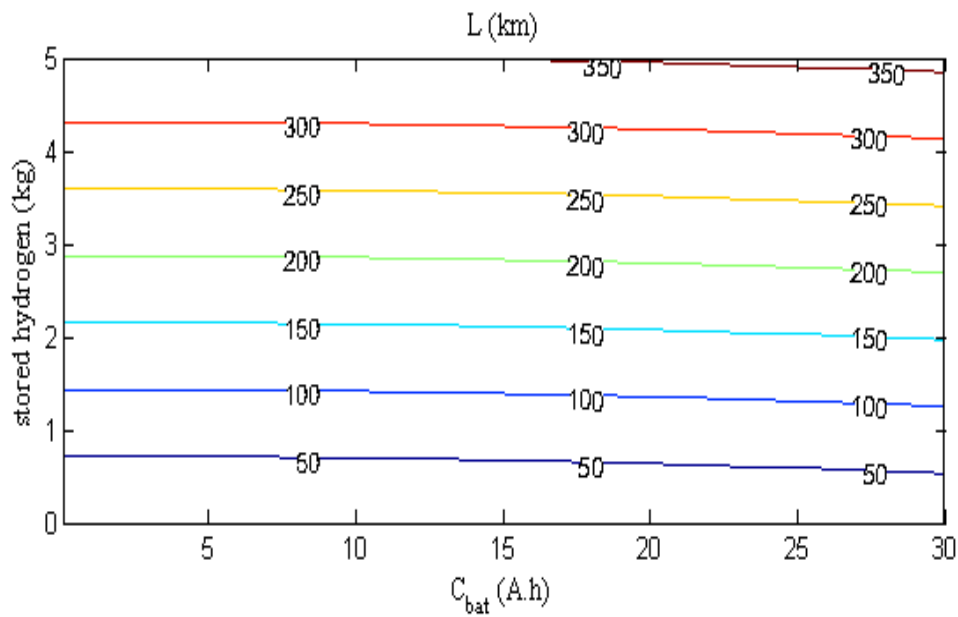
در شکل (۴-۱۰) نیز مشاهده می‌کنیم زمانی که زمان شتاب $t_u = 6s$ یک رابطه خطی بین $P_{fce-max}$ و C_{bat} برقرار می‌باشد.

۴-۲-۳- مسافت طی شونده

از معادلات (۳-۱۰) تا (۳-۱۴) متوجه می‌شویم که حداکثر مسافت طی شونده توسط خودرو (L) به صورت تابعی از جرم هیدروژن ذخیره شده (m_{hydro}) و ظرفیت باتری (C_{bat}) می‌باشد، $L = h(m_{hydro}, C_{bat})$. با افزایش جرم هیدروژن و یا ظرفیت باتری مسافت طی شونده، افزایش می‌یابد. البته حساسیت مسافت نسبت به تغییر در جرم هیدروژن ذخیره شده بسیار بیشتر از ایجاد تغییر در ظرفیت باتری می‌باشد ($L = 76.658m_{hydro} + 1.597C_{bat}$). نمودار مربوط به تابع حداکثر مسافت برحسب جرم هیدروژن و ظرفیت باتری در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. برای برقراری شرط $L \geq 300km$ همان‌طور که در شکل شماره (۴-۱۲) نشان داده شده است، جرم هیدروژن ذخیره شده باید بیش‌تر از ۴.۵ کیلوگرم باشد و ظرفیت باتری می‌تواند در هر محدوده دلخواهی باشد.



شکل (۴-۱۱): نمودار سه‌بعدی تابع مسافت L برحسب جرم هیدروژن و ظرفیت باتری



شکل (۴-۱۲): نمودار تابع مسافت L برحسب جرم هیدروژن و ظرفیت باتری

۴-۲-۴- بازنویسی قیود مسئله

حال با در نظر گرفتن نمودارهای فوق و همچنین مسئله بهینه‌سازی، به بازنویسی قیود مسئله می‌پردازیم. در واقع با مسئله‌ای روبرو می‌شویم که باید از شروط زیر پیروی کند:

جهت رسیدن به زمان شتاب مطرح شده در قید، حداکثر توان خروجی پیل سوختی باید بیش تر از 15 kw و ظرفیت باتری بیش تر از 15 A.h باشد.

برای رسیدن به شرط مربوط به مسافت طی شونده توسط خودرو، جرم هیدروژن مخزن باید بیش تر از 4.5 kg باشد.

برای رسیدن به شرط مربوط به حداکثر سرعت، حداکثر توان خروجی پیل سوختی و ظرفیت باتری باید به ترتیب بیش از 10 kw و 9 A.h باشند.

همچنین به دلیل داشتن محدودیت در وزن و فضا قیود زیر را نیز باید در نظر بگیریم:

$$\begin{cases} m_{hydro} \in [0,5]kg \\ C_{bat} \in [0,30]A.h \\ P_{fc\ max} \in [0,50]kw \end{cases} \quad (5-4)$$

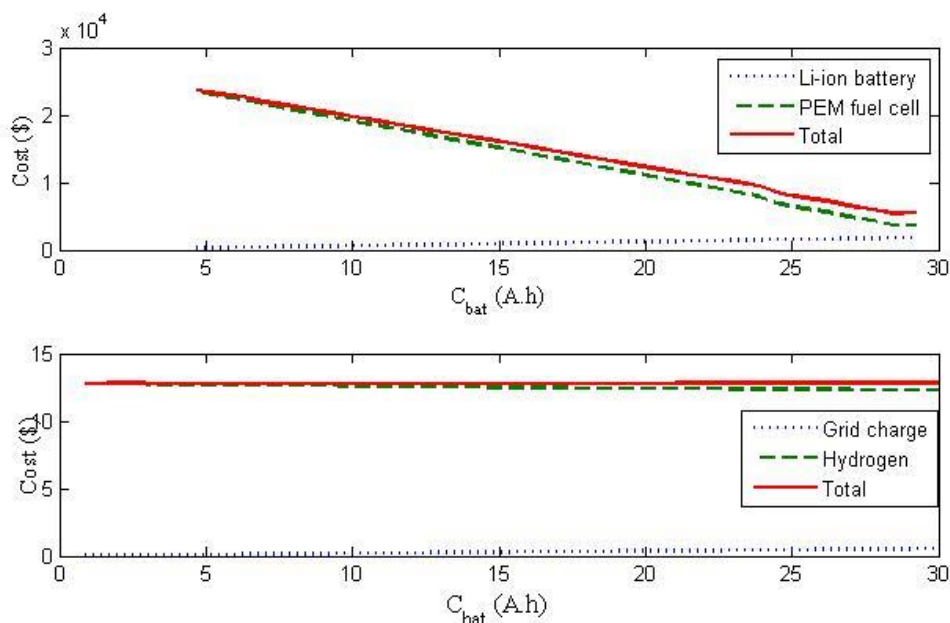
در نتیجه قیود زیر را برای مسئله خواهیم داشت:

$$\begin{cases} m_{hydro} \geq 4.5kg \\ C_{bat} \geq 15A.h \\ P_{fc\ max} \geq 15kw \end{cases} \quad (6-4)$$

قبل از حل مسئله بهینه‌سازی با قیود فوق اقدام به بررسی تغییرات هزینه‌های کلی، هزینه ثابت و هزینه مربوط به نگهداری خودرو می‌کنیم. برای این منظور تغییرات هزینه‌های فوق را در محدوده مجاز $L=300\ km$ و $t_u=6\ s$ را برحسب تغییرات ظرفیت باتری رسم می‌کنیم. در قسمت بالایی شکل (۴-۱۳) ارتباط بین هزینه ثابت ($cost_{fix}$) و ظرفیت باتری (C_{bat}) زمانی که $t_u=6\ s$ می‌باشد، نشان داده شده است. هزینه ثابت شامل هزینه سیستم پیل سوختی و هزینه مربوط به پکیج باتری می‌باشد. زمانی که ظرفیت باتری از 0 تا 30 A.h افزایش داده می‌شود، قیمت پکیج باتری از ۴۰۰ دلار تا ۱۷۰۰

دلار افزایش می‌یابد و هزینه سیستم پیل سوختی از ۲۳۲۰۰ دلار به ۵۰۰۰ دلار کاهش می‌یابد. هزینه کلی نیز از ۲۴۰۰۰ دلار به ۶۰۰۰ دلار کاهش می‌یابد. در نتیجه خواهیم داشت که افزایش ظرفیت باتری باعث ایجاد کاهش در هزینه ثابت سیستم می‌شود.

قسمت پایینی شکل (۴-۱۳) ارتباط بین هزینه نگهداری روزانه سیستم ($Cost_{ope}$) و ظرفیت باتری را زمانی که $L=300$ km می‌باشد، نشان می‌دهد. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود هزینه شارژ باتری از شبکه با افزایش ظرفیت باتری، افزایش می‌یابد ولی هزینه مربوط به هیدروژن مصرفی و هزینه کلی با کاهش مواجه می‌شود. در نتیجه خواهیم داشت که افزایش ظرفیت باتری باعث ایجاد کاهش در هزینه نگهداری سیستم می‌شود.



شکل (۴-۱۳): تأثیر ظرفیت باتری بر هزینه ثابت و هزینه نگهداری خودرو

از آنجایی که هر دو نوع هزینه تعریف شده برای خودرو یعنی هزینه‌های ثابت و نگهداری روزانه خودرو با افزایش ظرفیت باتری، کاهش می‌یابند بنابراین هزینه کلی سیستم ($Cost_{sys}$) در کل طول عمر خودرو نیز با افزایش ظرفیت باتری، کاهش می‌یابند.

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده تا این مرحله برای برآورده ساختن شرایط مناسب برای خودروی خانوادگی شهری مطرح‌شده و کاهش هزینه کلی آن، باید از نکته‌های به‌دست‌آمده زیر پیروی نمود:

● جهت رسیدن به زمان شتاب مطرح‌شده در قید، ظرفیت باتری باید بیش از 15 A.h باشد.

همچنین برای کاهش هزینه‌های ثابت و نگهداری، ظرفیت باتری باید تا حد امکان زیاد باشد.

● جهت رسیدن به زمان شتاب مطرح‌شده در قید، حداکثر توان خروجی پیل سوختی باید بیش-

تر از 15kw باشد.

● برای رسیدن به شرط مربوط به مسافت طی شونده توسط خودرو جرم هیدروژن مخزن باید

بیش‌تر از 4.5 kg باشد.

با توجه به حدود گفته‌شده و همچنین در نظر گرفتن این نکته که ظرفیت باتری هرچقدر بیش‌تر

باشد، هزینه کلی کمتر می‌شود.

مقادیر بهینه به‌صورت $(m_{hydro} = 4.5kg, C_{bat} = 30A.h, P_{fc\max} = 15kw)$ تعریف می‌شود.

۴-۳- صحه‌گذاری نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR

در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR نتایج حاصل از انجام محاسبات بهینه‌سازی را برای

خودروی پیل سوختی با مشخصات ذکر شده در جدول (۴-۱) در دو سیکل رانندگی تست می‌کنیم.

در واقع نرم‌افزار با شبیه‌سازی خودرو به ما نشان می‌دهد که آیا خودرو طراحی شده قادر به برآورده

ساختن قیود مطرح‌شده می‌باشد؟

۴-۳-۱- معرفی نرم‌افزار ADVISOR

نرم‌افزار ADVISOR یک نرم‌افزار شبیه‌سازی خودرو است که شامل مدل‌هایی از خودرو، فایل‌های

اجرایی و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۴ تولید گردید و از سال ۱۹۹۸ با

انجام بهینه‌سازی به محبوبیت بیشتری دست یافت. از آن تاریخ مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های

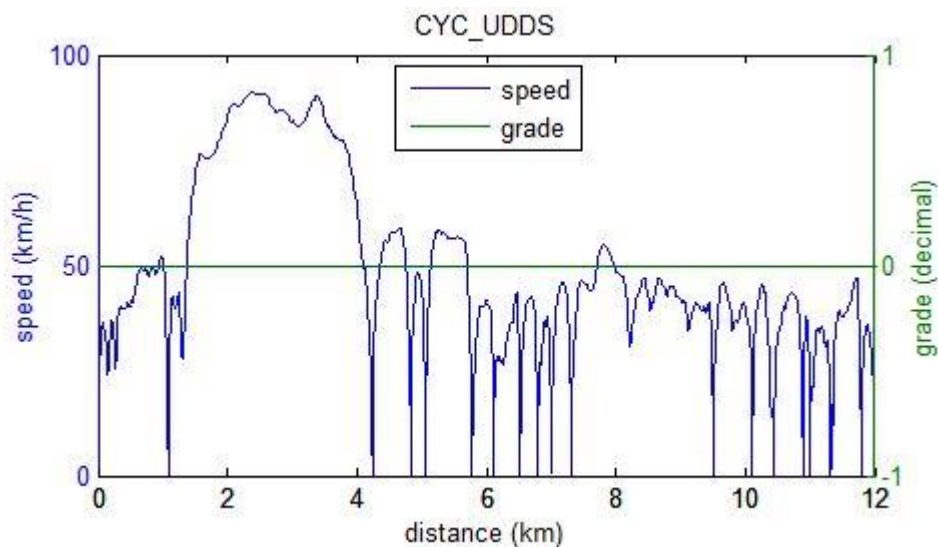
بزرگ خودروسازی در بررسی‌ها و تخمین عملکرد خودروهای تحت طراحی خود از آن بهره گرفته‌اند. این نرم‌افزار می‌تواند عملکرد دینامیکی خودروهای مختلف با کلاس‌ها، سایزها و سیستم‌های نیروی محرکه مختلف را مدل کند و همچنین قادر به شبیه‌سازی خودرو با نیروی محرکه مرسوم، شامل موتور احتراقی و انتقال‌دهنده‌های نیرو، خودروهای برقی و خودروهای هایبرید شامل موتور الکتریکی، باتری، سیستم‌های الکتریکی و کنترلی و موتور احتراقی و سیستم‌های مکانیکی می‌باشد. نرم‌افزار تخصصی ADVISOR یکی از بهترین و ساده‌ترین نرم‌افزارهای تخصصی درزمینه‌ی طراحی خودروی هایبرید است. کاربران این نرم‌افزار می‌توانند با طی مراحل ساده در درون نرم‌افزار و انتخاب نوع خودروی هایبرید خود، میزان مصرف سوخت و در کل نمودارهای مربوط به آزمون‌های عملی خودرو را با دقت بسیار بالا مشاهده کنند. از این نرم‌افزار در ساخت خودروهای معروفی همچون تویوتا پریوس نیز استفاده شده است. این نرم‌افزار توسط شرکت نرم‌افزاری AVL تولید شده و از سال ۲۰۰۰ تاکنون به‌عنوان یکی از بهترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی درزمینه‌ی خودرو به جهانیان شناسانده شده است.

۴-۳-۲- شبیه‌سازی در سیکل رانندگی UDDS

مشخصات این سیکل در جدول (۴-۲) و همچنین شکل (۴-۱۴) آورده شده است.

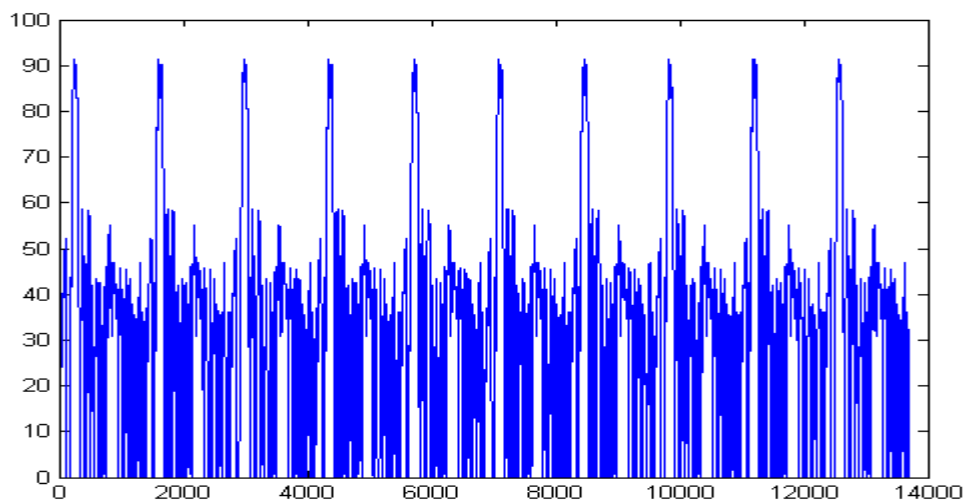
جدول (۴-۲): مشخصات سیکل رانندگی UDDS

سیکل	مدت زمان	مسافت	سرعت متوسط	تعداد ترمز	شتاب متوسط
UDDS	1369 S	11.99 Km	31.51km/h	17	0.5 m/s ²



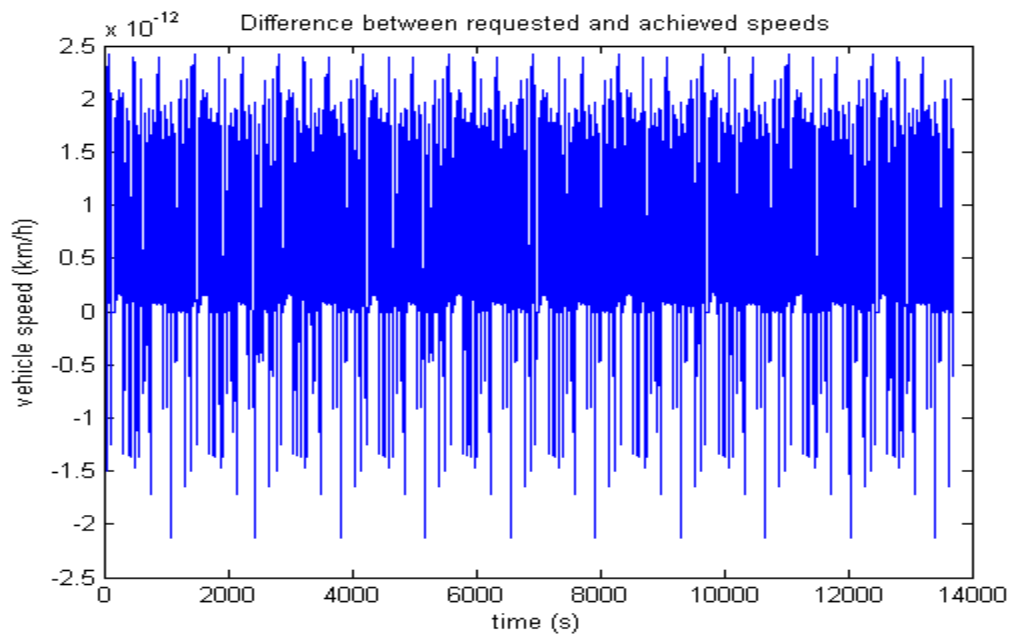
شکل (۴-۱۴): نمودار سرعت بر حسب مسافت در سیکل UDDS

در انجام شبیه‌سازی از این سیکل به صورت ده سیکل پشت سر هم که نتایج آن به صورت زیر می‌باشد.



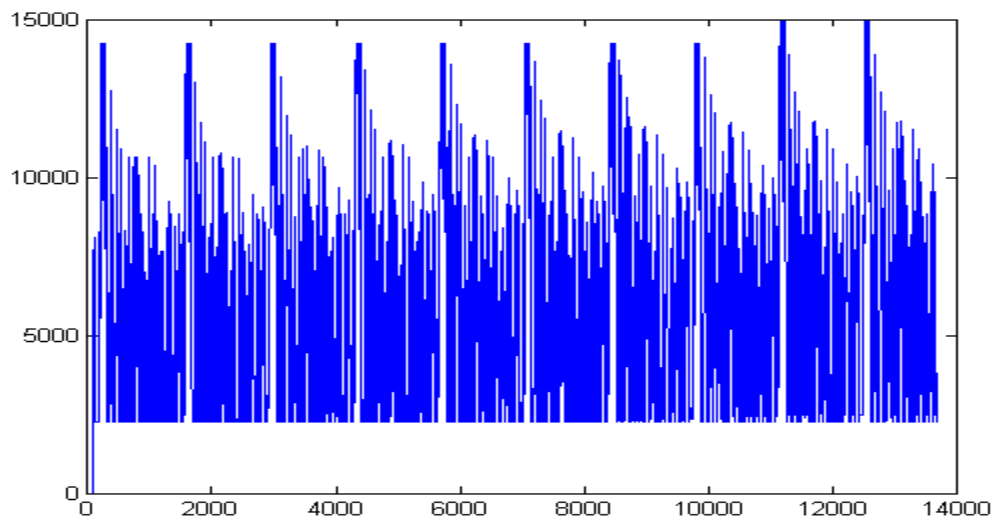
شکل (۴-۱۵): نمودار سرعت بر حسب زمان خودرو طراحی شده در سیکل UDDS

شکل (۴-۱۵) نشان می‌دهد خودرو توانسته سیکل مورد نظر را با توجه به سرعت‌های خواسته شده در سیکل طی کند. در واقع تفاوت سرعت مد نظر سیکل و سرعت خودرو بسیار ناچیز می‌باشد که این تفاوت را در شکل (۴-۱۶) می‌توانیم ببینیم.



شکل (۴-۱۶) تفاوت سرعت استاندارد سیکل و سرعت خودرو

حداکثر توان پیل سوختی در محاسبات 15 kw به دست آمده بود که در اینجا نیز منحنی توان خروجی پیل سوختی در طول زمان حرکت خودرو به صورت شکل (۴-۱۷) بوده است.



شکل (۴-۱۷): توان خروجی پیل سوختی در طول سیکل

حداکثر سرعت محاسبه شده در این سیکل 148.3 km/h و همچنین زمان شتاب (0-50 km/h) نیز 3.8 s به دست آمده است. یعنی قیود مورد نظر ما برآورده شده‌اند.

جدول (۳-۴): نتایج تست حداکثر سرعت و زمان شتاب

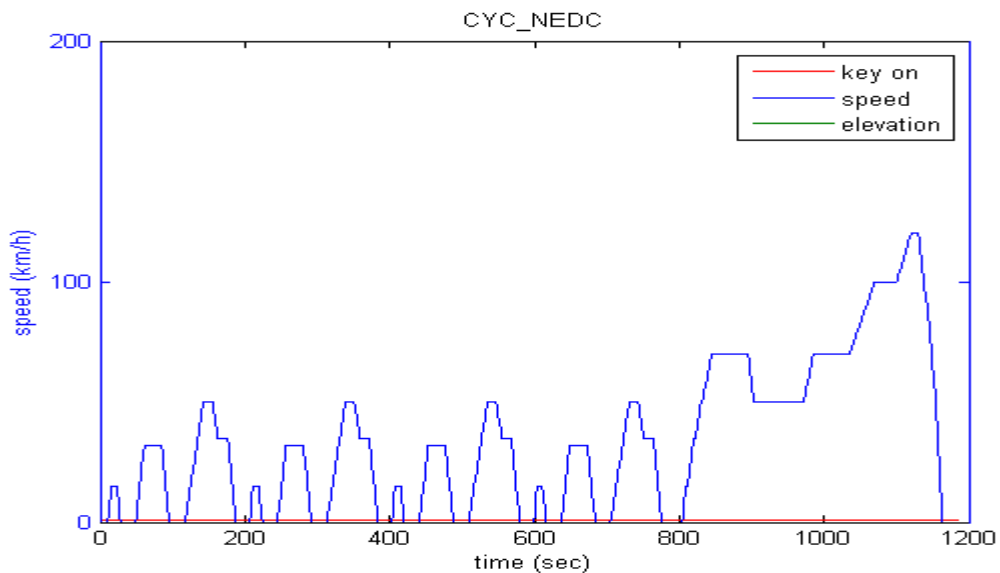
تست خودرو	مقدار
زمان شتاب (۰-۵۰)	4 s
زمان شتاب (۰-۱۰۰)	17.4 s
حداکثر سرعت	132.1 km/h

۳-۳-۴- شبیه‌سازی در سیکل رانندگی NEDC

مشخصات این سیکل در جدول (۴-۴) و همچنین شکل (۴-۱۸) آورده شده است. در انجام شبیه‌سازی از این سیکل نیز به صورت ده سیکل پشت سر هم استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت زیر می‌باشد.

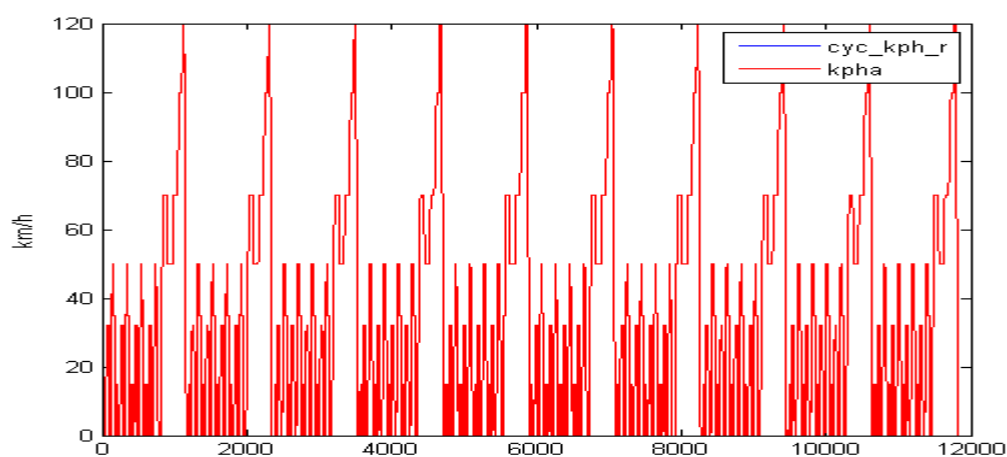
جدول (۴-۴): مشخصات سیکل رانندگی NEDC

سیکل	مدت زمان	مسافت	سرعت متوسط	تعداد ترمز	شتاب متوسط
NEDC	1184 S	10.93 Km	33.21km/h	13	0.54 m/s ²



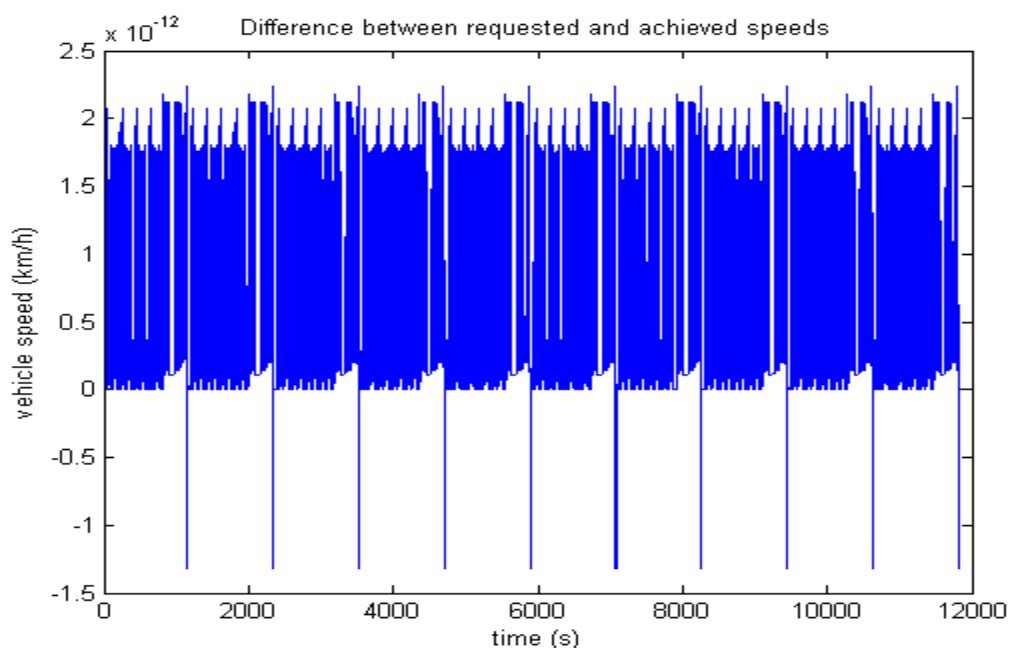
شکل (۴-۱۸): نمودار سرعت بر حسب مسافت در سیکل NEDC

شکل (۴-۱۹) نشان می‌دهد خودرو توانسته سیکل مورد نظر را با توجه به سرعت‌های خواسته شده در سیکل طی کند.



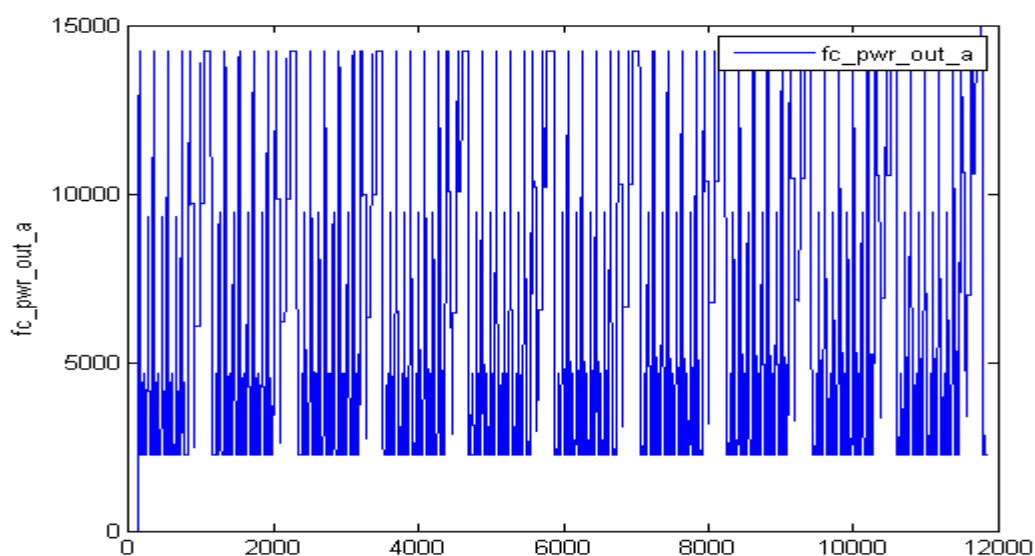
شکل (۴-۱۹): نمودار سرعت برحسب زمان خودرو طراحی شده در سیکل NEDC

در واقع تفاوت سرعت مد نظر سیکل و سرعت خودرو بسیار ناچیز می‌باشد که این تفاوت را در شکل (۴-۲۰) می‌توانیم این تفاوت را ببینیم.



شکل (۴-۲۰) تفاوت سرعت استاندارد سیکل و سرعت خودرو

منحنی توان خروجی پیل سوختی در طول زمان حرکت خودرو به صورت شکل (۴-۲۱) بوده است.



شکل (۴-۲۱): توان خروجی پیل سوختی در طول سیکل NEDC

حداکثر سرعت محاسبه شده در این سیکل 132.1 km/h و زمان شتاب (0-50 km/h) نیز 4 s به دست آمده است. یعنی قیود مورد نظر ما برآورده شده‌اند.

جدول (۴-۵): نتایج تست حداکثر سرعت و زمان شتاب در سیکل NEDC

تست خودرو	مقدار
زمان شتاب (۰-۵۰)	4 s
زمان شتاب (۰-۱۰۰)	17.4 s
حداکثر سرعت	132.1 km/h

فصل پنجم:

حل مساله بهینه سازی با

استفاده از نرم افزار **ADVISOR**

در این بخش اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای انتقال توان در یک خودروی پیل سوختی متصل به شبکه با هدف کمینه ساختن هزینه مربوط به پیل سوختی، باتری و موتور الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB با کمک نرم‌افزار ADVISOR می‌نماییم. در واقع با در نظر گرفتن پیل سوختی، باتری، موتور الکتریکی و سطح شارژ باتری به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی سعی در انتخاب یک مقدار بهینه برای متغیرهای فوق جهت کمینه کردن هزینه سیستم خودرو پیل سوختی می‌کنیم.

۵-۱-۱- الگوریتم ژنتیک

محدوده کاری الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع می‌باشد و هرروز با پیشرفت روزافزون علوم و تکنولوژی استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل بسیار گسترش یافته است. الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های محاسبات تکامل‌یافته هست که رابطه مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد. در واقع الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی می‌باشد. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مسئله به امید به دست آوردن جواب‌های بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب‌شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید. این فرایند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشد. الگوریتم‌های ژنتیک الگوریتم‌هایی هستند که دارای قدرت بسیار زیادی در یافتن جواب مسئله هستند، اما باید توجه داشت که شاید بتوان کاربرد اصلی این الگوریتم‌ها را در مسائلی در نظر گرفت که دارای فضای حالت بسیار بزرگ هستند و عملاً بررسی همه حالت‌ها برای انسان در زمان‌های نرمال (در حد عمر بشر) ممکن نیست. از طرفی باید توجه داشت که حتماً بین حالات مختلف مسئله باید

دارای پیوستگی مناسب و منطقی باشیم. در نهایت الگوریتم‌های ژنتیک این امکان را به ما می‌دهد که دارای حرکتی سریع در فضای مسئله به سوی هدف باشیم. به گونه‌ای که می‌توانیم تصور کنیم که در فضای حالات مسئله به سوی جواب مشغول پرواز هستیم. روند کلی بهینه‌سازی و حل مسائل در الگوریتم ژنتیک طبق مراحل زیر هست.

۱- شروع (Start): تولید تصادفی یک جمعیت (Population) که شامل تعداد زیادی کروموزوم (روش‌های حل مسئله) می‌باشد.

۲- صحت و درستی (Fitness): ارزیابی صحت برای تابع $f(x)$ به ازای هر کروموزوم x در جمعیت.

۳- ایجاد یک جمعیت جدید (New Population): تولید یک جمعیت جدید با انجام تمامی زیرگروه‌های زیر، تا آنکه یک جمعیت جدید ایجاد گردد.

۳-۱- انتخاب (Selection): انتخاب کروموزوم‌های پدر و مادر از جمعیت قبلی با توجه به صحت و درستی آن (Fitness)، بطوریکه هر چه Fitness بهتر باشد (دقت جواب در همگرایی بیشتر باشد) شانس بیشتری برای انتخاب دارد.

۳-۲- تولیدمثل (Crossover): انجام زادوولد و ایجاد یک نسل جدید.

۳-۳- جهش (Mutation): مشخص شدن مکان فرزند تولیدشده در کروموزوم

۳-۴- پذیرش (Accepting): جا دادن فرزند جدید در داخل جمعیت.

۴- جایگزینی (Replace): جایگزینی جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی و مورد استفاده قرار دادن جمعیت جدید در مراحل بعدی الگوریتم.

۵- امتحان (Test): اگر شرایط مطلوب در حل مسئله ارضا شد اعلام می‌کنیم که به بهترین جواب رسیده‌ایم و از الگوریتم خارج می‌شویم در غیر این صورت به مرحله ۲ می‌رویم و دوباره همین روند را تکرار می‌کنیم.

۵-۲ روش حل

در این روش با توجه به مدل‌های مختلف باتری، پیل سوختی و موتور الکتریکی که در جدول‌های زیر مشخصات آن‌ها آورده شده است و همچنین در نظر گرفتن یک سری قیود حداقلی برای خودرو و با استفاده از الگوریتم ژنتیک کار بهینه‌سازی به صورت زیر انجام می‌شود.

جدول (۱-۵): قیود موردنظر در مسئله

قیود	مقادیر
Time0-50 km/h (sec)	≤ 6
$\Delta_{\text{trace}}(\text{km/h})$	≤ 5
Top speed(km/h)	≥ 120

جدول (۲-۵): مشخصات کلی خودرو

وزن بدنه خودرو	1024 kg
توان جانبی خودرو	2 kw
شعاع چرخ خودرو	0.28 m
ضریب دراگ آیرودینامیکی	0.41
مساحت سطح بادخور جلو	1.8 m ²

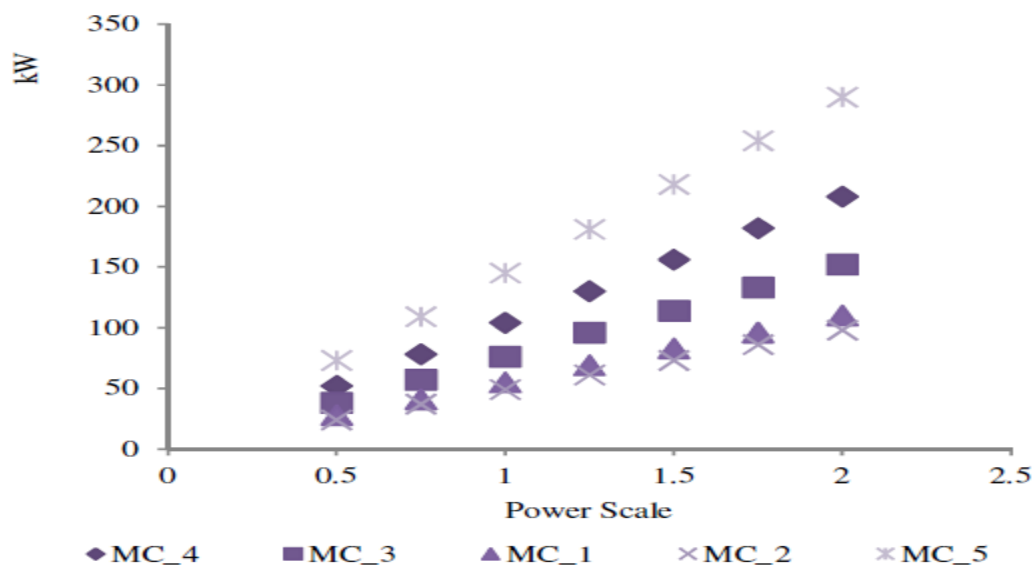
جدول (۳-۵): مشخصات انواع پیل سوختی موجود در ADVISOR

FC component	FC_1	FC_2	FC_3	FC_4	FC_5
nominal power (kW)	32	50	55	33	12
system weight (Kg)	170	223	400	162	115
specific power (kW/kg)	0.188	0.224	0.138	0.204	0.104

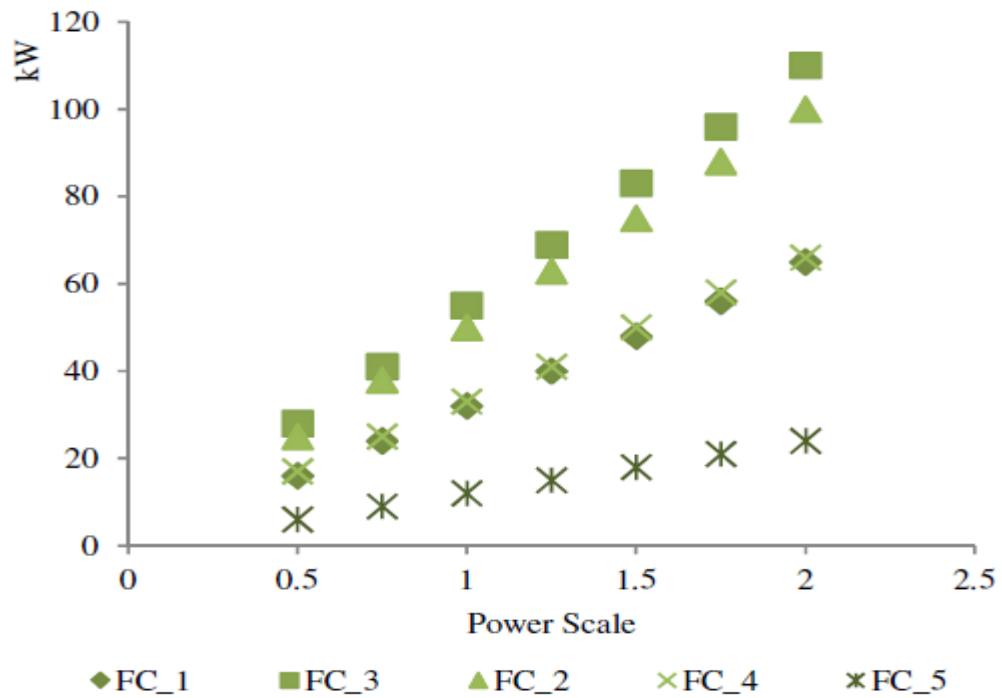
جدول (۴-۵): مشخصات انواع موتور الکتریکی القایی موجود در ADVISOR

MC component	MC_1	MC_2	MC_3	MC_4	MC_5
nominal power (kW)	55	49	76	104	145
system weight (Kg)	91	60	57	102	66
specific power (kW/kg)	0.604	0.817	1.333	1.02	2.2

علاوه بر متغیرهایی نظیر نوع باتری، نوع پیل سوختی، نوع موتور الکتریکی و سطح شارژ باتری پارامتر دیگری تحت عنوان power scale برای سیستم پیل سوختی و موتور الکتریکی به عنوان یک متغیر مهم در مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. نرم‌افزار ADVISOR با استفاده از تابع Scaling function اندازه موتور و پیل سوختی را بر اساس توان خروجی آن‌ها محاسبه می‌کند. در این روش بهینه‌سازی در واقع با تغییر این پارامتر، توان خروجی و وزن پیل سوختی و موتور الکتریکی را تغییر می‌دهد. در واقع مقدار یک برای این پارامتر نشان‌دهنده‌ی توان نامی برای پیل سوختی و موتور الکتریکی هست و محدوده تغییر این پارامتر را بین [0.5, 2] در نظر گرفته‌ایم. در شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) مقادیر توان خروجی پیل سوختی و موتور الکتریکی برحسب متغیر power scale نشان داده شده است.



شکل (۱-۵): توان خروجی انواع موتور الکتریکی برحسب Power scale



شکل (۵-۲): توان خروجی انواع پیل سوختی برحسب پارامتر Power scale

جدول (۵-۵): مشخصات انواع باتری موجود در ADVISOR

BAT component	BAT_1	BAT_2	BAT_3	BAT_4
battery chemistry	Lithium (module)	Lithium (module)	Lithium (module)	Lithium (module)
nominal voltage (V)	3.7	3.6	3.6	3.6
low limit voltage (V)	2.7	2.5	2.5	2.5
hi limit voltage (V)	4.2	4	4	4
energy capacity (Ah)	40	7	20	30
weight (Kg)	1	0.37	0.8	1.1

در مورد باتری‌ها نمی‌توان از این متغیر استفاده نمود اما در طراحی خودرو برای باتری‌ها می‌توان تعداد ماژول‌های سری باتری را تغییر داد به همین خاطر تعداد ماژول‌های سری باتری به‌عنوان یک متغیر

بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه کار بهینه‌سازی را با هفت متغیر انجام خواهیم داد که این متغیرها در جدول (۵-۶) آورده شده‌اند.

جدول (۵-۶): حدود متغیرهای مسئله بهینه‌سازی

FC model	FC power scale	MC model	MC power scale	BAT model	BAT mod. number	BAT CS level
FC_1	0.5-2	MC_1	0.5-2	BAT_1	50-200	0.2-0.8
FC_2		MC_2		BAT_2		
FC_3		MC_3		BAT_3		
FC_4		MC_4		BAT_4		
FC_5		MC_5		-----		

۵-۲-۱- تابع هدف

تابع هزینه به صورت زیر نوشته می‌شود:

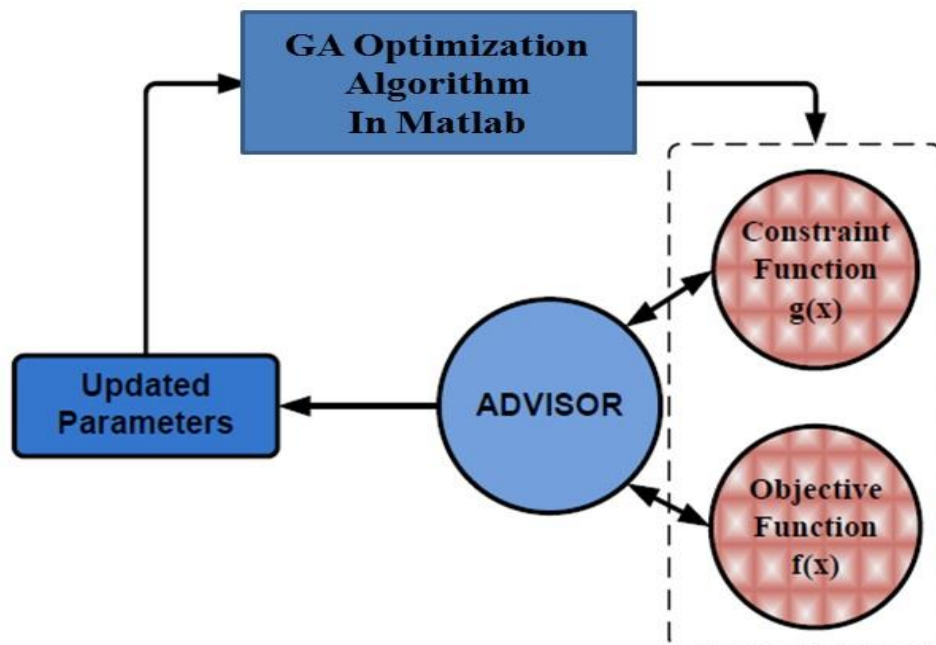
$$\min_x f(x) = \min(\text{FC}_{\text{cost}}(\$) + \text{BAT}_{\text{cost}}(\$) + \text{MC}_{\text{cost}}(\$)) \quad (۵-۱)$$

دو قسمت اول تابع هزینه مربوط به پیل سوختی و باتری می‌باشند و در معادله (۳-۱۶) بیان شده‌اند. هزینه موتور الکتریکی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{MC}_{\text{cost}}(\$) = P \left(20 \left(\frac{P}{m} \right) + 0.25 \right) \quad (۵-۲)$$

با مشخص شدن تابع هدف و انتخاب سیکل رانندگی از بین سیکل‌های موجود در نرم‌افزار ADVISOR، اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی تک هدفه می‌نماییم. در واقع بهینه‌سازی به این صورت می‌باشد که از بین چند مدل موتور الکتریکی، پیل سوختی و همچنین مقادیر مناسب برای power scale و cs و تعداد مازول باتری بهترین ترکیب که هزینه را حداقل می‌کند و هم قیود موردنظر ما را در سیکل رانندگی برآورده می‌سازد، انتخاب می‌شود. برای حل مسئله به روش الگوریتم ژنتیک، اقدام به تولید یک جمعیت اولیه با ۲۵ کروموزوم می‌کنیم. در واقع هر کروموزوم متشکل از هفت ژن می‌-

باشد، که همان متغیرهای بهینه‌سازی مسئله هستند. اگر متغیرهای بهینه‌سازی را فقط مدل‌های باتری، پیل سوختی و موتور الکتریکی در نظر می‌گیریم ۱۰۰ حالت مختلف از ترکیب این متغیرها به وجود می‌آید ولی با در نظر گرفتن متغیرهای دیگر تعداد ترکیب‌های ممکن بی‌نهایت می‌شود. پس از تولید جمعیت اولیه، هر کروموزوم (خودروی طراحی‌شده) باید توسط نرم‌افزار ADVISOR در یک سیکل رانندگی ارزیابی می‌شود. برای این کار از تابع مشخصی به نام `adv_no_gui` که این قابلیت را به ما می‌دهد تا بتوانیم از نرم‌افزار شبیه‌سازی در حلقه‌ی الگوریتم ژنتیک استفاده کنیم.



شکل (۵-۳): استفاده از ADVISOR در الگوریتم ژنتیک

پس از انجام محاسبات به هر ذره یک مقدار برازندگی تعلق می‌گیرد، که به هر ذره با مقدار کمتر رتبه بالاتری اختصاص داده می‌شود. در مرحله بعدی چند جفت کروموزوم با رتبه بالاتری اقدام به تولید-مثل می‌کنند، که از ترکیب والدین دو فرزند ایجاد می‌شود. در گام بعدی فرآیند جهش اتفاق می‌افتد، که این فرآیند باعث تنوع در جمعیت تولیدشده می‌شود و پس از انجام این مرحله فرآیند تولید نسل جدید به پایان می‌رسد. این عمل تا ۱۰۰ نسل تکرار می‌شود و در نهایت بهترین جواب‌ها را خواهیم داشت.

۵-۲-۲- نتایج به دست آمده در دو سیکل متفاوت

نتایج حاصل از انجام بهینه‌سازی در دو سیکل UDDS و NEDC به شرح زیر می‌باشد.

جدول (۷-۵): نتایج بهینه‌سازی با استفاده از ADVISOR

CYC	Objective	FC model	FC scale	MC model	MC scale	BAT model	BAT modules	CS level
NEDC	Min Cost	2	1.625	1	0.682	2	50	0.507
UDDS	Min Cost	1	1.438	1	0.685	2	58	0.271

با توجه به نتایج موجود در جدول (۷-۵) مشاهده می‌شود که برای دو سیکل دلخواه نتایج کمی با هم متفاوت می‌باشند. در واقع با توجه به هدف تعریف شده جهت حداقل کردن تابع هدف به عنوان مثال برای سیکل NEDC مقادیر بهینه برای پارامترها با این صورت می‌باشد: پیل سوختی شماره ۲ با ۱.۶۲۵ توان نامی، موتور الکتریکی شماره ۱ با ۰.۶۸۲ توان نامی، باتری شماره ۲ با تعداد ۵۰ ماژول و با مقدار $CS=0.507$.

جدول (۸-۵): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
Population size	25
Generation	100
Mutation probability	0.1
Crossover probability	0.8

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه ابتدا یک مدل توصیف کننده ارتباط بین پارامترهای انتقال توان (ظرفیت باتری، مقاومت الکتریکی باتری، حداکثر توان پیل سوختی، راندمان پیل سوختی، جرم هیدروژن مخزن و توان جانبی) و عملکرد خودرو (حداکثر سرعت، زمان شتاب، مسافت L_1 و مسافت L_2) برای یک خودروی پیل سوختی با مشخصات خودروی سواری پراید پیشنهاد داده ایم. در مدل پیشنهاد شده مشخص شده است که در محدوده کاری موتور الکتریکی، نتایج زیر را خواهیم داشت.

✓ با افزایش حداکثر توان پیل سوختی، حداکثر سرعت خودرو با شیب $1.22 \text{ km(h kw)}^{-1}$ تا حداکثر توان پیل سوختی برابر با 33 kw افزایش می یابد.

✓ با افزایش ظرفیت باتری، حداکثر سرعت خودرو تقریباً به صورت خطی و با شیب $1.6 \text{ km.h}^{-2} \text{ A}^{-1}$ افزایش می یابد.

✓ با افزایش مقاومت متوسط باتری، حداکثر سرعت خودرو با شیب $3.2 \text{ km(h.m}\Omega)^{-1}$ کاهش می یابد.

✓ با افزایش توان جانبی خودرو، حداکثر سرعت با شیب $0.625 \text{ km(h.kw)}^{-1}$ کاهش می یابد.

✓ با افزایش حداکثر توان پیل سوختی، زمان شتاب خودرو با شیب 0.13 s kw^{-1} کاهش می یابد.

✓ با افزایش توان جانبی خودرو، زمان شتاب با شیب 0.375 s(kw)^{-1} افزایش می یابد.

✓ با افزایش ظرفیت باتری زمان شتاب به صورت غیرخطی دچار کاهش می شود. به عنوان مثال وقتی ظرفیت باتری 10 A.h باشد زمان شتاب ۱۰ ثانیه می باشد و در ظرفیت های بیش تر زمان شتاب کاهش می یابد. با افزایش مقاومت متوسط باتری، زمان شتاب به صورت غیر خطی افزایش می یابد.

✓ مسافت طی شونده خودرو توسط توان حاصل از پیل سوختی L_1 به صورت خطی با افزایش راندمان پیل و جرم هیدروژن ذخیره شده پیل افزایش می یابد.

✓ مسافت طی شونده L_1 به صورت خطی و با شیب 7 km kw^{-1} با افزایش توان جانبی خودرو کاهش می یابد.

✓ مسافت طی شونده توسط خودرو در حالت CD یعنی زمانی که فقط از باتری جهت حرکت خودرو استفاده می شود با افزایش ظرفیت باتری، با شیب تقریبی 0.8 km(Ah)^{-1} افزایش می یابد. با افزایش مقاومت متوسط باتری این مسافت به صورت خطی کاهش می یابد.

✓ مسافت طی شونده توسط خودرو در حالت CD به صورت خطی و با شیب 0.5 km kw^{-1} با افزایش توان جانبی خودرو دچار کاهش می شود.

بر اساس تحلیل های انجام شده تا این مرحله برای برآورده ساختن شرایط مناسب برای خودروی خانوادگی شهری مطرح شده و کاهش هزینه کلی آن و با در نظر گرفتن این نکته که با افزایش ظرفیت باتری در مسافت و زمان شتاب ثابت معین شده هزینه کلی خودرو کاهش می یابد و اشتراک گرفتن از سه ناحیه مجاز به دست آمده از شکل های (۴-۷) تا (۴-۱۲)، باید از نکته های به دست آمده زیر پیروی نمود:

● جهت رسیدن به زمان شتاب مطرح شده در قید، ظرفیت باتری باید بیش از 15 A.h باشد. همچنین برای کاهش هزینه های ثابت و نگهداری، ظرفیت باتری باید تا حد امکان زیاد باشد.

● جهت رسیدن به زمان شتاب مطرح شده در قید، حداکثر توان خروجی پیل سوختی باید بیش تر از 15kw باشد.

● برای رسیدن به شرط مربوط به مسافت طی شونده توسط خودرو جرم هیدروژن مخزن باید بیش تر از 4.5 kg باشد.

با توجه به حدود گفته شده و همچنین در نظر گرفتن این نکته که ظرفیت باتری هرچقدر بیشتر باشد، هزینه کلی کمتر می شود.

مقادیر بهینه به صورت $(m_{hydro} = 4.5kg, C_{bat} = 30A.h, P_{fc\ max} = 15kw)$ تعریف می شود.

۶-۲- پیشنهادات

باتوجه به اینکه در این پایان نامه بهینه سازی با استفاده از معادله دینامیک خودرو انجام شده است و همچنین در محاسبه مسافت طی شونده خودرو از سیکل سرعت ثابت استفاده شده است، برای کارهای آینده موارد زیر پیشنهاد می شود.

✓ با طراحی سیکل های داخل کشور و در نظر گرفتن این سیکل ها اقدام به طراحی بهینه یک خودرو با حداقل مصرف سوخت و حداکثر مسافت طی شونده کنیم.

✓ سیستم های ذخیره ساز انرژی به عنوان حیاتی ترین قسمت از خودروهای هایبریدی هستند. هزینه نگهداری و جایگزینی باتری ها به طول عمر و دوام آن ها بستگی دارد. از این رو منطقی می باشد که به طراحی یک استراتژی کنترلی دقیق و بهینه برای افزایش طول عمر باتری ها پرداخته شود.

✓ شبیه سازی خودرو در دما و شرایط آب و هوایی نرمال انجام شده است. برای شبیه سازی دقیق تر می توان شرایط دمایی و آب و هوایی مختلف را در نظر گرفت.

✓ با افزایش متغیرهای بهینه سازی مرتبط با کنترلرها می توان بهینه سازی دقیق تری انجام داد.

- [1] Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.
- [2] Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., ... & Speizer, F. E. (1993). An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England journal of medicine*, 329(24), 1753-1759.
- [3] www.fcc.gov.ir/FuelCell-Usage.aspx
- [4] <http://www.toyota.com/hybrid/>
- [5] Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2009). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC press.
- [6] Kumar, L., Gupta, K. K., & Jain, S. (2013, May). Architecture and configuration of electrified vehicles: A review. In *Industrial Electronics (ISIE), 2013 IEEE International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Bilgin, B., Emadi, A., & Krishnamurthy, M. (2012, June). Switched reluctance generator with higher number of rotor poles than stator poles. In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012 IEEE* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S. S., & Lukic, S. M. (2005). Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 54(3), 763-770.
- [9] Chau, K. T., & Wong, Y. S. (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 43(15), 1953-1968.
- [10] Ghorbani, R., Bibeau, E., & Filizadeh, S. (2010). On conversion of hybrid electric vehicles to plug-in. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(4), 2016-2020.
- [11] Nemry, F., Leduc, G., & Muñoz, A. (2009). *Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency* (No. JRC54699). Institute for Prospective and Technological Studies, Joint Research Centre.

- [12] Kramer, B., Chakraborty, S., & Kroposki, B. (2008, November). A review of plug-in vehicles and vehicle-to-grid capability. In *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE* (pp. 2278-2283). IEEE.
- [13] Gao, Y., & Ehsani, M. (2010). Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(2), 633-640.
- [14] Wu, J., Yuan, X. Z., Martin, J. J., Wang, H., Zhang, J., Shen, J., ... & Merida, W. (2008). A review of PEM fuel cell durability: degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*, 184(1), 104-119.
- [15] Rodatz P, Paganelli G, Sciarretta A, Guzzella L.(2005). Optimal power management of an experimental fuel cell/super capacitor-powered hybrid vehicle. *Control Energy Pract*,13(1), 41–53.
- [16] Lin, C. C., Peng, H., Grizzle, J. W., & Kang, J. M. (2003). Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 11(6), 839-849.
- [17] Jain, M., Desai, C., Kharma, N., & Williamson, S. S. (2009, November). Optimal powertrain component sizing of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle using multi-objective genetic algorithm. In *Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE* (pp. 3741-3746). IEEE.
- [18] Wu, Y., & Gao, H. (2006). Optimization of fuel cell and supercapacitor for fuel-cell electric vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 55(6), 1748-1755.
- [19] Cai, Q., Brett, D. J. L., Browning, D., & Brandon, N. P. (2010). A sizing-design methodology for hybrid fuel cell power systems and its application to an unmanned underwater vehicle. *Journal of Power Sources*, 195(19), 6559-6569.
- [20] Xu, L., Ouyang, M., Li, J., Yang, F., Lu, L., & Hua, J. (2013). Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost. *Applied Energy*, 103, 477-487.
- [21] Xu, L., Yang, F., Li, J., Ouyang, M., & Hua, J. (2012). Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuel cell city bus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15380-15392.

- [22] Xu, L. F., Hua, J. F., Li, X. J., Meng, Q. R., Li, J. Q., & Ouyang, M. G. (2008, September). Control strategy optimization of a hybrid fuel cell vehicle with braking energy regeneration. In Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE (pp. 1-6). IEEE.
- [23] Paganelli, G., Delprat, S., Guerra, T. M., Rimaux, J., & Santin, J. J. (2002). Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th (Vol. 4, pp. 2076-2081). IEEE.
- [24] Lin, C. C., Peng, H., & Grizzle, J. W. (2004, June). A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles. In American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004 (Vol. 5, pp. 4710-4715). IEEE.
- [25] Zhang, X., Mi, C. C., Masrur, A., & Daniszewski, D. (2008). Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor. *Journal of Power Sources*, 185(2), 1533-1543.
- [26] Segura, F., & Andújar, J. M. (2012). Power management based on sliding control applied to fuel cell systems: A further step towards the hybrid control concept. *Applied Energy*, 99, 213-225.
- [27] Xu, L., Li, J., Hua, J., Li, X., & Ouyang, M. (2009). Optimal vehicle control strategy of a fuel cell/battery hybrid city bus. *international journal of hydrogen energy*, 34(17), 7323-7333.
- [28] Barai, A. , Guo, Y. , McGordon, A. , & Jennings, P. (2013, December). A study of the effects of external pressure on the electrical performance of a lithium-ion pouch cell. In Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on (pp. 295-299). IEEE.

Abstract:

In this thesis, two methods for optimal sizing of power sources in plug-in fuel cell electric vehicle have been introduced. At first, a theoretical model is presented to describe the relationship between components' parameters and vehicle performance. It is understood that when the electric motor works in a normal mode, the maximum velocity and driving distance are influenced linearly by the parameters of the components, e.g. fuel cell efficiency, fuel cell output power, stored hydrogen mass, vehicle auxiliary power, battery capacity, and battery average resistance. Next, It is proposed an optimal sizing method for hybrid powertrains that minimize fixed and operation costs of plug-in fuel cell electric vehicle. Where fixed cost is the fixed cost of the fuel cell system and battery packages and operation cost is the lifetime operation cost of the two power sources (hydrogen and electricity). By solving the optimization problem and obtain the optimal values, it is confirmed the performance accuracy of vehicle by using ADVISOR software by implementing in two standard cycles.

Keywords: Electric vehicles, Fuel cell, Battery, Hybrid fuel cell electric vehicle, Plug-in, Optimal sizing, Cost function.



Shahrood University of Technology

Department of Electrical and Robotic Engineering

Optimal sizing of power sources in plug-in fuel cell electric vehicles

By:
Seyed Reza Azizi Ghalesari

Supervisor:
Dr.Amin Hajizadeh

Advisor:
Dr.Morteza Rahimian

Date : Januray 2015