

# طراحی و ساخت خودروی سواری هیبرید برقی پراید در دانشگاه کاشان

ابوالفضل حلوایی نیاسر<sup>۱</sup>، سعید گلابی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۴/۳۰

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۱۲/۳

## چکیده:

این مقاله به منظور توسعه فناوری خودروهای هیبرید برقی و استفاده از منابع موجود در کشور، به توصیف مراحل طراحی و ساخت اولین خودروی سواری هیبرید برقی با پلتفرم پراید در ایران با نام شهاب ۲ پرداخته است. در این خودرو با توجه به هزینه و محدودیت زمانی، از آرایش موازی نوع مستقل یا (Trough –the –Road) TTR استفاده شده است. موتور احتراق داخلی در این خودرو، همان موتور پراید CC ۱۳۰۰ است. بخش نیرومحركه الکتریکی خودرو روی محور عقب خودرو قرار داده شده‌اند. موتور الکتریکی مورد استفاده از نوع PMSM با توان نامی ۲۲ kW بوده که به روش کنترل برداری و با اینورتر بردار فضایی در دو حالت کنترل سرعت و کنترل گشتاور کار می‌کند. برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی از باتری‌های نوع لیتیوم-یون پلیمر با مجموع ولتاژ ۱۹۲ ولت استفاده گردیده است. برای عملکرد مناسب خودرو در حالت‌های مختلف، واحد کنترل هیبرید (HCU) به نحوی طراحی و ساخته شده است که می‌تواند خودرو را در حالات فقط برقی، فقط احتراقی، عملکرد هیبریدی و حالت ترمزی بازیاب قرار دهد. راهبرد کنترلی در این خودرو از نوع کنترل On/Off بوده که با میکروکنترلر پیاده‌سازی گردیده است. با توجه به اضافه شدن سیستم محركه الکتریکی به خودرو و در نتیجه تغییر وزن و مرکز جرم خودرو، و جهت افزایش پایداری، شاسی تقویت گردیده که نتایج با نرم افزار اجزا محدود ANSYS صحت‌گذاری گردیده‌اند. سیستم انتقال نیروی مناسب با نسبت دنده ثابت و دیفرانسیل در بخش عقب خودرو برای موتور الکتریکی طراحی گردیده است. بدنه خودرو نیز از لحاظ آیرودینامیکی در نرم افزارهای Gambit و Fluent تحلیل گردیده است.

## کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی انرژی، کاهش مصرف سوخت، خودروی هیبرید برقی، درایو الکتریکی، موتور احتراق داخلی

## مقدمه

علیرغم انجام تحقیقات وسیع جهت افزایش بازده و بهینه‌سازی مصرف سوخت خودروهای احتراق داخلی (ICE)، این خودروها هم اکنون به عنوان منبع عمده آلودگی هوا در مناطق شهری معرفی شده‌اند. علاوه بر مساله آلودگی هوا، محدودیت منابع سوخت فسیلی، استفاده غیربهینه از سوخت در خودروهای احتراق داخلی را زیر سؤال برده است. ابتدا به نظر می‌رسید که خودروهای برقی جایگزینی مناسب برای خودروهای احتراق داخلی بشمار می‌آیند، اما چگالی پایین ذخیره انرژی باتری‌ها در مقایسه با چگالی انرژی سوخت‌های فسیلی سبب کاهش برد خودروهای برقی و در نتیجه عدم موفقیت تجاری آنها بویژه در رده خودروهای سواری گردیده است [۱]. خوشبختانه فکر خودروی برقی با پیشرفت در فناوری پیل سوختی جان تازه‌ای گرفته است و تقریباً تمامی شرکت‌های خودرو ساز معتبر جهان، خودروهای با پیل سوختی (FCV) را بعنوان راه حل دراز مدت و راهبردی صنعت خودروسازی در نظر گرفته‌اند که البته در کوتاه مدت محقق نخواهد شد. صاحب‌نظران اعتقاد دارند که تا زمان فراهم شدن امکان بکارگیری فناوری پیل سوختی در سطح تجاری، خودروهای HEV می‌توانند بعنوان راه حل میانی برای مساله آلودگی هوا و مصرف بهینه سوخت در نظر گرفته شوند [۲،۳].

در کشور ما نیز با توجه به مساله آلودگی شهرهای بزرگ بخصوص تهران، محدودیت در تولید سوخت و همچنین آزدسازی قیمت انواع سوخت، برخی صنایع خودروسازی را تشویق به انجام پژوهش‌هایی در طراحی و ساخت خودروی هیبرید نموده است. همچنین جهت انجام پژوهش‌های بیشتر و شتاب دادن به این موضوع، نهادهای مسئول، مراکز دانشگاهی را به انجام پژوهش و فناوری در این زمینه تشویق نموده‌اند. مقاله حاضر نیز در راستای توسعه فناوری ساخت خودروهای هیبرید، به تبیین مراحل طراحی و ساخت سواری هیبرید برقی بر اساس خودروی پراید مدل سایپا ۱۳۲ پرداخته است. ابتدا به چگونگی انتخاب آرایش هیبریدی مورد استفاده، پلت‌فرم خودرو و مشخصات و ملزومات موردنظر در طراحی و ساخت پرداخته می‌شود. سپس طراحی اجزای مکانیکی مختلف خودرو شامل طراحی فریم و شاسی، سیستم انتقال قدرت، تحلیل آیرودینامیکی بدنه خودرو و همچنین سیستم‌های مکانیکی جانبی خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه، به طراحی و انتخاب اجزای مختلف نیرومحرکه الکتریکی خودرو نظیر موتور و درایو الکتریکی، باتری و سایر سیستم‌های جانبی الکتریکی پرداخته می‌شود. در بخش بعد، سیستم کنترل انرژی و توان در خودرو (واحد HCU) توضیح داده می‌شود. در نهایت، نتایج آزمایش‌های میدانی خودرو ارائه خواهند گردید. به دلیل تنوع و حجم مطالب سعی شده است تا از بیان فرمول‌ها و جزییات غیرضروری پرهیز گردد.

## کلیات طرح

خودروی هیبریدی موضوع این مقاله یک خودروی هیبرید برقی چهار نفره جهت شرکت در سومین مسابقه ملی طراحی ماشین بوده است که باید دارای مشخصات عملکردی زیر باشد:

- پیمایش ۴۴,۲۵ Km با ۲ لیتر بنزین در حالت هیبرید
- پیمایش ۱۲,۳ Km در سیکل شهری در حالت فقط برقی
- موتور احتراق داخلی بنزینی حداکثر CC ۱۸۰۰

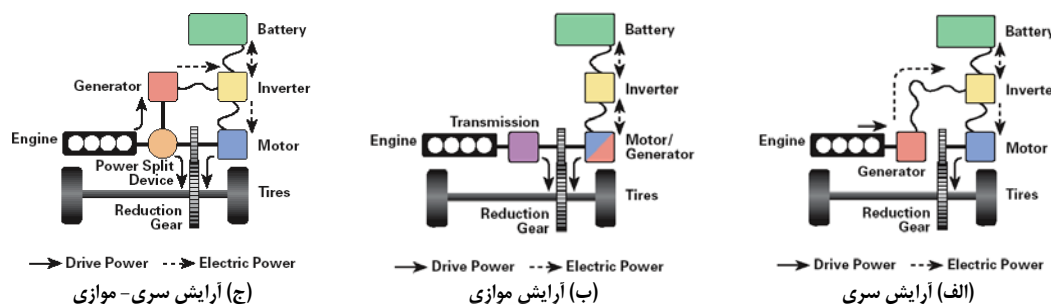
مقررات و محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارند که طی مقاله به تناسب بحث به آنها پرداخته می‌شود. دو موضوع مهم در این پروژه انتخاب نوع آرایش هیبریدی و همچنین پلتفرم خودرو بوده است. در انتخاب این دو موضوع عوامل مهمی همچون قوانین مسابقه، هزینه تمام شده، محدودیت زمانی آماده‌سازی خودرو، محدودیت‌های فناوریانه و موجود بودن تجهیزات مورد نیاز در بازار تاثیرگذار بوده‌اند که در جای خود به آنها اشاره خواهد شد.

### انتخاب نوع آرایش هیبرید

خودروهای هیبرید برقی به سه دسته کلی آرایش هیبرید سری، موازی و سری- موازی تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل (۱) طرح کلی آنها نمایش داده شده است [۴]. در خودروی هیبرید سری، درجه هیبریداسیون (نسبت توان موتور احتراقی به توان موتور الکتریکی) برابر با ۱۰۰ درصد یا یک بوده، به آن معنا که توان هر دو موتور احتراقی و الکتریکی باید معادل یکدیگر باشند. لذا وزن خودرو با آرایش سری در مقایسه با توان آن افزایش چشمگیری می‌یابد. در نتیجه، از آرایش سری کمتر در سواری‌های هیبریدی استفاده می‌شود. در خودروی هیبرید موازی از دو موتور الکتریکی و احتراقی در حالت‌های مختلف تکی و ترکیبی برای رانش خودرو استفاده می‌شود. این نوع خودرو نیز بسته به درجه هیبریداسیون انواع مختلفی دارد. آرایش موازی از حیث تطابق با خودروهای احتراقی، همخوانی بیشتری دارد به این معنا که بدون تغییرات عمده در پلتفرم خودروی احتراقی، می‌توان آن را به یک خودروی هیبرید برقی تبدیل نمود. از نظر محل قرارگیری بخش‌های الکتریکی و احتراقی نیز آرایش موازی به دو گونه هم‌محور و غیرهم‌محور دسته‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های هیبرید موازی هم‌محور، شافت موتور الکتریکی و موتور احتراقی روی یک محور مشترک قرار گرفته‌اند. سیستم‌های هیبرید موازی غیر هم‌محور نیز به سه دسته با ترکیب‌کننده قبل از جعبه دنده، با ترکیب‌کننده بعد از جعبه‌دنده و آرایش موازی مستقل تقسیم‌بندی می‌شوند [۴]. تقریباً اغلب انواع آرایش‌های موازی نیازمند طراحی گیربکس و سیستم انتقال مناسب بوده و لذا با توجه به محدودیت‌های زمانی و پایین آمدن هزینه ساخت این پروژه، آرایش موازی مستقل یا TTR انتخاب گردید. در این آرایش از یک خودروی احتراقی موجود با کمترین تغییرات در سیستم مکانیکی موتور احتراقی می‌توان یک خودروی هیبرید موازی ساخت.

از مزایای آرایش مستقل می‌توان به بازگشت انرژی در ترمز بازیاب، بازده بالاتر نسبت به سیستم سری، امکان استفاده از پلتفرم‌های موجود و پیچیدگی ساخت کمتر اشاره نمود. در مقابل، عدم امکان شارژ باتری‌ها در حالت توقف خودرو،

محدودیت در ناحیه کاری موتور الکتریکی به دلیل استفاده از گیربکس دور ثابت بر روی محور عقب از معایب این آرایش است.



شکل (۱) آرایش‌های مختلف خودروهای هیبرید برقی

شکل (۲) ساختار کلی خودروی هیبریدی TTR شهاب ۲ را نمایش می‌دهد. از آنجا که این سیستم بر روی یک خودروی دیفرانسیل جلو قابل پیاده‌سازی است، دامنه انتخاب پلت‌فرم آماده نیز وسیع‌تر خواهد بود.

## انتخاب پلت‌فرم

برای خودروی مورد نظر دو گزینه اساسی پیش رو بوده است. اولین گزینه، استفاده از فریم و شاسی یک خودروی آماده است که در بازارهای داخلی در دسترس باشد و تغییرات مورد نیاز روی آن انجام شود. گزینه‌ی دوم، ساخت فریم و شاسی از ابتدا و بر اساس نیازهای جانمایی، استحکام و ایمنی بوده است. با توجه به عواملی مانند هزینه، زمان، امکان ساخت و...، تصمیم بر این شد که از فریم و شاسی آماده یکی از خودروهای موجود در بازارهای داخلی استفاده گردد و در همین راستا، خودروهای پراید، پژو ۴۰۵، رآ، پژو ۲۰۶ تیپ ۲، ریو، تندر ۹۰ و سمند مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی عواملی چون هزینه، وزن، حجم، پایداری، ایمنی و ارگونومی مورد بررسی قرار گرفته و پس از امتیاز دهی، خودروی پراید سایپا ۱۳۲ به عنوان مناسب‌ترین خودرو انتخاب گردید [۵].

## ساختار خودروی هیبریدی شهاب ۲

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در خودروی هیبریدی شهاب ۲ که از نوع موازی مستقل و یا TTR می‌باشد، موتور احتراقی و گیربکس روی محور جلوی خودرو قرار داشته و با سازوکار انتقال قدرت به چرخ‌ها متصل می‌گردد. یک موتور الکتریکی با توانی برابر با نصف توان موتور احتراقی روی چرخ‌های عقب قرار دارد که از این موتور برای راه‌اندازی خودرو و طی مسیر خودرو در سرعت‌های کم و همچنین به صورت ژنراتور جهت بازیاب انرژی جنبشی در حالت ترمزی استفاده خواهد شد. یک گیربکس دور ثابت و دیفرانسیل نیز به چرخ‌های عقب متصل می‌شود. در بین

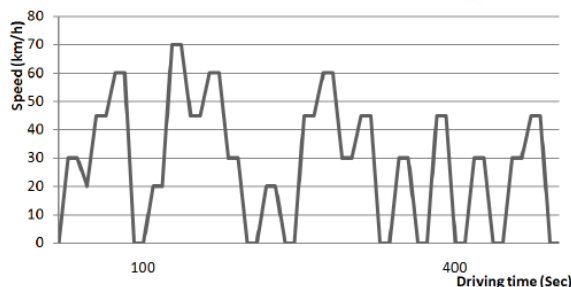
گیربکس دور ثابت و موتور الکتریکی یک کوپلینگ وجود دارد که تحت فرمان سیستم کنترل (HCU) قرار دارد و این سیستم، انتقال قدرت یا عدم انتقال قدرت را توسط این کوپلینگ روی چرخ های عقب کنترل می کند [۵].

### محاسبات کارایی خودرو

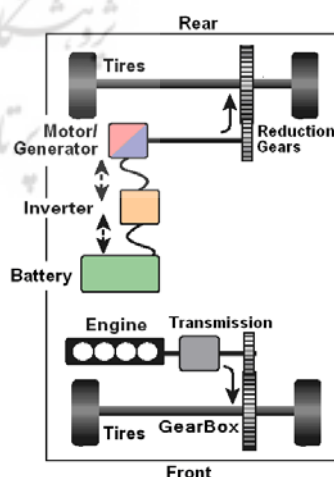
در این بخش، روند انجام شده برای محاسبه معیارهای کارایی خودرو نظیر شیب روی، برد، سرعت و شتاب بدون ذکر فرمول و محاسبات آورده می شوند [۵].

### محاسبه برد

در محاسبات مربوط به برد خودرو ابتدا یک سیکل شهری مطابق شکل (۳) شبیه سازی شده است، به این ترتیب که تغییرات سرعت خودرو در زمان های مختلف و مدت زمان حرکت های سرعت ثابت خودرو در این سیکل پیش بینی شده است. پس از آن برای دو حالت برد تمام برقی و برد هیبریدی، با توجه به نحوه استفاده از موتورها در دو حالت مذکور، شماره دنده ای که خودرو در آن در حال حرکت خواهد بود و نیز نوع حرکت خودرو در بازه های زمانی مختلف (حرکت شتاب دار و یا حرکت سرعت ثابت)، نیروهای مقاوم حرکت و پس از آن توان لازم برای غلبه بر آن نیروها محاسبه شده و انرژی مورد نیاز برای آن از منابع موجود انرژی (۲ کیلووات ساعت باتری و ۲ لیتر بنزین) کسر می شود. در نتیجه، با انرژی محدودی که در اختیار است، میزان برد خودرو محاسبه می شود [۵]. در حالت الکتریکی کامل، برد خودرو با شارژ کامل برابر با ۱۲,۳ Km خواهد بود و در حالت هیبریدی با دو لیتر بنزین و شارژ کامل برابر با ۴۴,۲۵ Km به دست می آید.



شکل ۳) سیکل شهری مورد استفاده برای حرکت خودرو



شکل ۲) ساختار کلی خودروی هیبریدی TTR شهاب ۲

## محاسبه سرعت و شتاب خودرو

در محاسبه سرعت و شتاب برای مسیر  $400\text{ m}$  آزمون، در صورت استفاده خودرو از حداکثر قدرت خود، شتاب صفر تا چهارصد متر خودرو  $17\text{ m/s}$  خواهد بود که در انتهای این مسیر سرعت خودرو به  $127\text{ Km/h}$  خواهد رسید [۵۶].

## محاسبه شیب‌روی

در محاسبه شیب‌روی بیشینه با فرض مود شتاب‌گیری برای حرکت، که با استفاده از آن هر دو موتور (عقب و جلو) می‌توانند نیروی پیشران برای خودرو تامین کنند، ابتدا نیروهای مقاوم حرکت تعیین می‌شود و بعد از آن با اعمال قانون دوم نیوتون در سطح شیب‌دار و نیز با توجه به قیدی که برای جلوگیری از لغزش چرخ‌های جلو به حرکت اعمال می‌شود، می‌توان میزان شیب روی بیشینه و نیز مقدار شتاب بیشینه خودرو در آن شیب را به دست آورد که به ترتیب عبارتند از  $22$  درجه ( $40,5$  درصد) و  $1,254\text{ m/s}^2$ .

## طراحی و محاسبات اجزای مکانیکی خودرو

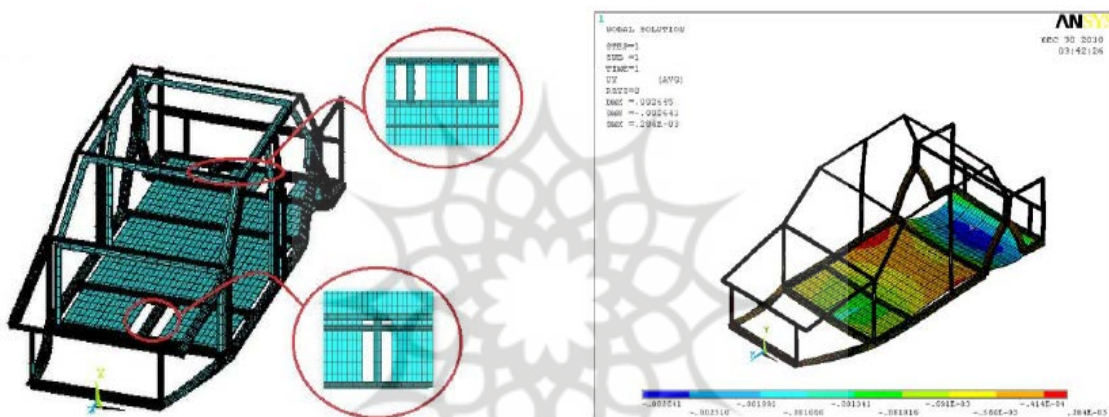
### طراحی فریم و شاسی

با اضافه شدن موتور الکتریکی و متعلقات آن به عقب خودرو، نیاز به تغییر و طراحی مجدد در برخی از قسمت‌های شاسی احساس شده است. طراحی انجام شده شامل پنج گام است: در گام اول، پس از شناسایی بارها، محل اعمال آنها مشخص می‌گردد، در گام دوم، با بررسی و مقایسه بارگذاری‌ها، خطرناک‌ترین حالت بارگذاری به دست می‌آید؛ در سومین گام، شکل قفس واژگونی انتخاب می‌شود؛ در گام چهارم، مدل در نرم‌افزار ANSYS ایجاد می‌شود و در گام آخر نیز مدل تحلیل شده و داده‌ها بررسی و تغییرات لازم در شاسی اعمال می‌گردند و دوباره تحلیل صورت می‌گیرد [۵]. بر اساس نتایج تحلیل‌های بدست آمده مطابق شکل (۴)، در قسمت عقب و کف صندوق عقب اعوجاج بسیار است. همچنین جابجایی در جایی که دسته موتور قرار دارد بالاست. لذا با قرار دادن تیرهای مشخص شده در شکل (۵) شاسی تقویت گردیده است.

### سیستم انتقال قدرت

همانطور که گفته شد، در قسمت عقب خودرو از یک موتور الکتریکی به همراه گیربکس با نسبت تبدیل ثابت و دیفرانسیل خودروی پراید استفاده می‌گردد. جهت محاسبه نسبت دنده مناسب، از مقدار گشتاور لازم برای شیب روی بیشینه، سرعت نامی موتور الکتریکی و سرعت بیشینه خودرو استفاده می‌گردد. برای گیربکس عقب خودرو، تنها دو حالت در نظر گرفته می‌شود: (الف) گیربکس در حالت دنده ۱ ثابت شود و (ب) گیربکس در حالت دنده ۲ ثابت شود. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که با ثابت کردن دنده گیربکس عقب بر روی دنده دو در مقایسه با حالتی که دنده عقب بروی

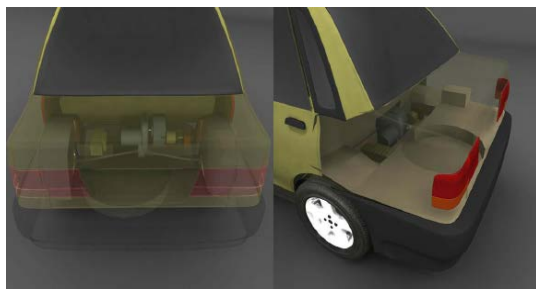
دنده یک ثابت شود، شتاب حرکت خودرو به روی شیب کمتر خواهد بود که دلیل آن نیز کاهش نسبت تبدیل گشتاور می‌باشد. ولی در حالت دنده ۲ خودرو قادر به پیمایش شیب بیشتری خواهد بود که دلیل آن نیز کاهش نیروی اینرسی در نتیجه کاهش شتاب و نهایتاً افزایش نیروی عکس‌العملی تکیه گاه بروی چرخ‌های جلو می‌باشد که افزایش توانایی شیب روی را به همراه خواهد داشت. همچنین در حالت دنده ۲ در مقایسه با حالت دنده ۱، خودرو در حرکت معمولی خود با موتور الکتریکی نیز دارای سرعت بیشینه‌ی بیشتر خواهد بود. نهایتاً با در نظر گرفتن این موارد، در محور محرک عقب، از دنده ۲ گیربکس پراید استفاده خواهد شد.



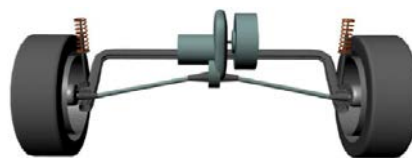
شکل ۵) نمایش کانتور جابجایی در حالت بارگذاری استاتیکی

شکل ۴) نمایش کانتور جابجایی در حالت بارگذاری استاتیکی

چیدمان نهایی موتور الکتریکی و گیربکس در روی محور عقب در شکل (۶) نشان داده شده است. برای انتقال توان از موتور الکتریکی به گیربکس از یک محور کوتاه فولادی استفاده می‌شود. در نهایت، مجموعه موتور و گیربکس به صورت یک واحد یکپارچه خواهند شد و برای نگهداری مجموعه در انتهای خودرو، کافی است گیربکس را مهار کرد. همچنین از فضای اضافه در بخش عقب برای جانمایی باتری‌ها، موتور الکتریکی و گیربکس استفاده گردیده است. این جانمایی در شکل (۷) نشان داده شده است [۵].



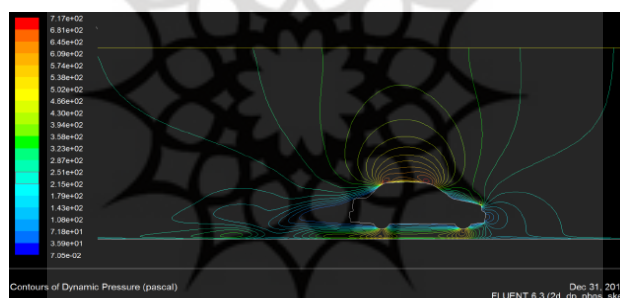
شکل ۷) جانمایی قسمت عقب



شکل ۶) چیدمان نهایی موتور و گیربکس در روی محور عقب

### آیرودینامیک بدنه خودرو

آیرودینامیک بدنه خودرو تاثیر زیادی در کاهش مصرف انرژی خودرو بویژه در سرعت‌های بالا و شتاب‌گیری دارد و لذا نیازمند بررسی‌ها و تحلیل‌های پیچیده‌ای برای انتخاب نوع انحنای بدنه و مکان قرارگیری آنهاست. روی خودروی هدف که به دلیل انتخاب پلت فرم پراید به صورت آماده، باید facelift انجام شود، تحلیل‌هایی در نرم افزارهای Gambit و Fluent روی آن انجام شده است. در این تحلیل، ابتدا بدنه خودرو در نرم افزار Gambit مدل‌سازی شده و سپس برای انجام تحلیل‌ها به نرم افزار Fluent انتقال یافته است و با استفاده از معادلات حاکم نیروی های وارد بر خودرو بخصوص در سرعت های بالا و در هنگام شتاب‌گیری بررسی گردیده‌اند. توزیع سرعت و فشار بدست آمده از تحلیل در نرم افزار Fluent حول محور خودرو در سرعت ۲۰ m/s در شکل (۸) مشاهده می‌شود. مطابق شکل، بیشترین فشار دینامیکی به منطقه سقف و تایرها وارد می‌شود که برای مورد اول در قسمت بدنه تدابیری اندیشیده شده و ستون‌های تقویتی اضافه گردیده است. [۵].



شکل ۸) توزیع فشار دینامیکی حول خودرو

### محاسبه مرکز جرم خودرو

جرم خودروی پراید بدون سوخت ۸۴۵ Kg بوده که با قرار گرفتن تجهیزات الکتریکی به وزن مجموع ۷۵ Kg، جرم خودروی هیبریدی بدست آمده ۹۲۰ Kg است. با نوشتن محاسبات استاتیکی، فاصله مرکز جرم خودرو هیبرید از محور جلو و سطح زمین به ترتیب برابر است با ۱۶۹ cm و ۵۲ cm. مقدار ۴۴ درصد از وزن خودرو بر روی محورهای عقب بوده و ۵۶ درصد دیگر نیز بر روی محورهای جلوی خودرو است [۵۶].

### سیستم‌های مکانیکی جانبی خودرو

#### ۵-۱- سیستم فرمان و کنترل

سیستم فرمان استفاده شده در خودروی پراید از نوع دنده شانه‌ای می‌باشد. با توجه به بررسی های صورت گرفته و استانداردهای موجود، برای حرکت غربلیک فرمان نیرویی معادل ۵ الی ۲۰ نیوتن لازم می‌باشد [۶] و لذا طراحی بر اساس



نیروی ماکزیمم یعنی ۲۰ نیوتن (توسط راننده بر غریبک اعمال می‌شود) در نظر گرفته شده است. نتایج محاسبات صورت گرفته مبین آن است که سیستم فرمان خودروی پراید به طور کامل تأمین کننده معیارهای طراحی در این خودرو می‌باشد.

### سیستم تعلیق

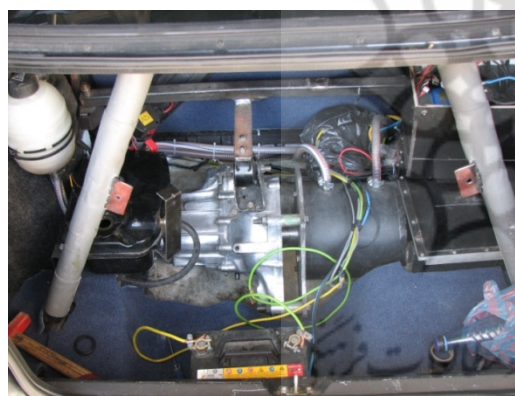
در بررسی سیستم تعلیق ابتدا از لحاظ راحتی سرنشین و تعداد درجات آزادی که برای خودرو در نظر گرفته می‌شود، مناسب‌ترین مدل سازی انتخاب گردیده است. مدل مورد استفاده، مدل یک چهارم خودرو با دو درجه آزادی می‌باشد [۷]. در ادامه، با توجه به روابط دینامیکی حاکم بر مجموعه و استفاده از اعداد جادویی در طراحی سیستم تعلیق، سختی و دمپینگ مورد نیاز برای تعلیق جلو و عقب (فنرها و کمک‌فنرها) تعیین و ضرایب تصحیح محاسبه شده‌اند. با توجه به اینکه در عقب نیز از فنرهای چرخ‌های جلو استفاده شده است، برای دستیابی به تعلیقی مشابه قبل، دو قطعه به مجموعه اضافه شده‌اند که در نهایت، به روش المان محدود این اجزا تحلیل شده‌اند. ضرایب سختی فنرهای جلو و عقب به ترتیب برابر با  $N/m$  و  $۹۹۱۰۰$  و  $۷۹۲۸$   $N/m$ ، ضرایب میرایی کمک فنرهای جلو و عقب به ترتیب برابر با  $۹۰۶$   $N.s/m$  و  $۷۳۳$   $N.s/m$  به دست آورده شده‌اند.

### طراحی و انتخاب اجزای الکتریکی خودرو

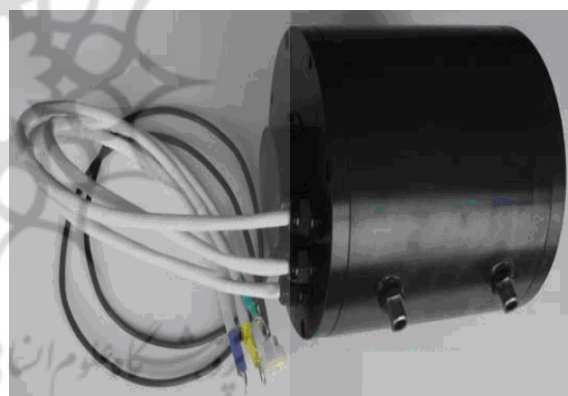
#### ۱-۱- انتخاب موتور الکتریکی

ادوات الکترونیک قدرت جدید و ساخت نمونه‌های تجاری اینورترهای فرکانسی، عملاً سبب کنار گذاشته شدن موتورهای DC علی‌رغم مزایای آنها، در کاربردهای خودروهای برقی و هیبرید گردیده است و در مقابل استفاده از موتورهای AC شتاب بیشتری گرفته است [۸]. از میان انواع موتورهای AC، موتورهای القایی، DC بدون جاروبک (BLDC) و سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) رواج بیشتری دارند و نمونه‌های زیادی از خودروهای برقی و هیبرید با این سه نوع موتور ساخته شده‌اند. جدول (۱) برخی از مشخصات این موتورها را باهم مقایسه می‌کند. از این بین، موتور PMSM انتخاب گردیده است. شکل (۹) موتور PMSM مورد استفاده در این پروژه را نشان می‌دهد که مدل GLMP15L0 ساخت شرکت M&C Electric Power Co کشور چین می‌باشد [۹]. جدول (۲) نیز مشخصات اصلی موتور مورد استفاده را خلاصه نموده است. به دلیل توان بالای موتور، خنک‌سازی موتور به وسیله آب و یک رادیاتور مستقل انجام می‌گیرد که البته در کاربردهای خودرویی ایجاد سیستم خنک‌سازی موتور و اینورتر با آب نسبت به خنک‌سازی با هوا، راحت‌تر و موثرتر می‌باشد. شکل (۱۰) جانمایی موتور الکتریکی و گیربکس کاهشی با نسبت ثابت را در بخش عقب خودروی شاهب ۲ نشان می‌دهد.

جدول (۲) مشخصات اصلی موتور PMSM مورد استفاده				جدول (۱) مقایسه مشخصات چند نوع موتور تراکشن متداول				
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	DC	PMSM	القایی	واحد	
۱۴۴ V	ولتاژ نامی	۲۲ kW	توان نامی	۸۰	۹۵	۹۰	%	بهره موتور
٪۹۵	راندمان	۳۰ kW	توان حداکثر	۰,۴	۱,۱	۰,۷	kW/kg	چگالی توان
F	کلاس عایقی	۷۰ N.m	گشتاور نامی	۱۰۰	۱۴۰	۹۰		قیمت بر مبنای (DC=100)
IP55	حفاظت	۱۵۰ N.m	گشتاور حداکثر	۴۰۰	۱۰۰	۲۰۰		وزن بر مبنای (PM=100)
۴۵ kg	وزن	rpm ۳۰۰۰	سرعت نامی	خوب	خوب	ضعیف		عملکرد در سرعت پائین
Φ238×245	ابعاد	rpm ۶۰۰۰	سرعت حداکثر	ضعیف	متوسط	خوب		عملکرد در سرعت بالا
				ساده	ساده	پیچیده		ترمز بازتابی



شکل ۱۰) جانمایی موتور و گیربکس آن در خودروی شاهب ۲



شکل ۹) موتور PMSM مورد استفاده در خودروی هیبرید پراید

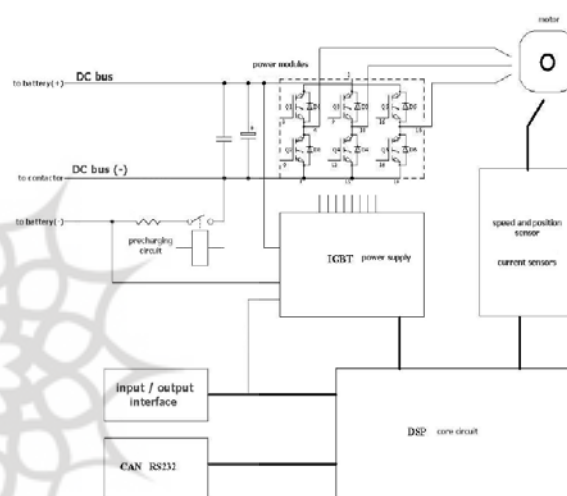
### درایو الکتریکی

روش‌های متداول کنترل موتورهای PMSM عبارتند از کنترل اسکالر، کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور (DTC) [۱۰]. تنظیم سرعت و گشتاور موتور PMSM مورد استفاده در این پروژه به روش کنترل برداری انجام می‌شود. سرعت واقعی از روی سیگنال‌های موقعیت ارسال شده توسط شافت اینکودر در DSP محاسبه می‌گردد. اینورتر مورد استفاده از نوع شش سوئیچ با سوئیچ‌های از نوع IGBT است که به روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) که نسبت به دیگر انواع روش‌ها نظیر شش پله‌ای و PWM سینوسی بهتر است، کلیدزنی می‌گردد. به دلیل حجم زیاد مطالب از آوردن نتایج شبیه‌سازی عملکرد درایو و موتور الکتریکی خودداری شده است.

تمام الگوریتم‌های کنترلی و حفاظتی درایو و اینورتر توسط یک DSP نوع TMS320LF2407A انجام می‌پذیرد [۱۱]. شکل (۱۱) ساختار کلی درایو الکتریکی مورد استفاده در این پروژه را نشان می‌دهد. در جدول (۳) نیز مشخصات نامی اینورتر مورد استفاده در این پروژه خلاصه گردیده است. اقدامات حفاظتی متعددی در برنامه کنترلی برای محافظت از موتور و اینورتر در برنامه‌نویسی DSP پیاده‌سازی شده است [۵].

جدول (۳) مشخصات اینورتر مورد استفاده در پروژه

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
٪۹۵	راندمان	۴۵ kVA	توان حداکثر
IP54	حفاظت	۲۰۰-۱۴۰ V	ولتاژ DC ورودی
۱۱,۵ kg	وزن	۱۲۵ A	جریان نامی
آب و رادیاتور	نوع خنک‌سازی	۲۰۰ A	جریان حداکثر



شکل (۱۱) ساختار کلی درایو الکتریکی مورد استفاده

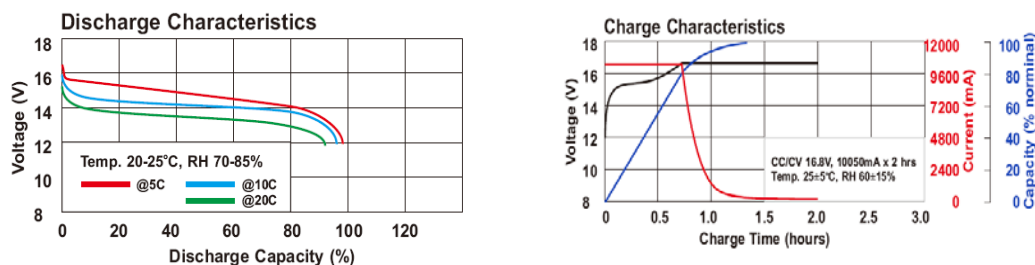
### سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری)

ایده اساسی استفاده از خودروی هیبرید، بهینه نمودن عملکرد موتور احتراقی است. همچنین با توجه به معیارهای طراحی که در قبلا اشاره شد، از موتور الکتریکی فقط در ناحیه سرعت پایین استفاده می‌گردد. لذا در خودروی هیبرید طراحی شده، در سرعت‌های پایین (کمتر از ۴۰ Km/h) که موتور احتراقی از بهره کمی برخوردار است، فقط از موتور الکتریکی استفاده شود. همچنین در موقع ترمز گرفتن، انرژی جنبشی خودرو حتی الامکان توسط عملکرد ترمز ژنراتوری موتور الکتریکی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی، ذخیره گردد. انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز در خودروهای هیبریدی عبارتند از باتری، ابرخازن و چرخ‌های طیار. از این میان، استفاده از باتری متداول‌تر از انواع دیگر سیستم‌هاست. باتری‌های بکار رفته در کاربردهای تراکشن را می‌توان به انواع سرب-اسید (Pb-AC)، نیکل-متال هیدراید (Ni-MH)، انواع لیتیومی شامل لیتیوم-یون (Li-Ion) و نوع جدید و مقاوم‌تر لیتیوم-یون-پلیمر دسته‌بندی نمود [۱۲]. جدول (۴) مقایسه مشخصات انواع

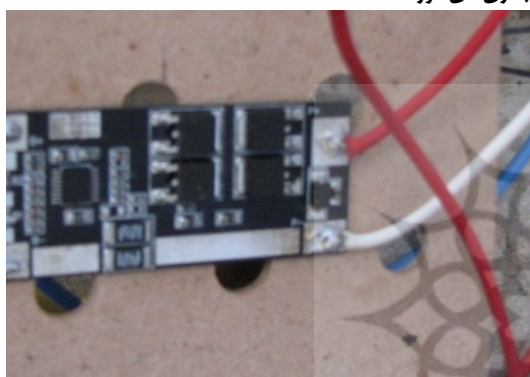
باتری‌ها نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. باتری‌های مورد استفاده در این پروژه از نوع لیتیم-یون-پلیمر بوده که برخی مشخصات آن در جدول (۵) آورده شده‌اند [۱۳].

جدول ۵) مشخصات باتری لیتیم - یون-پلیمر مورد استفاده		جدول ۴) مقایسه انواع باتری‌ها در کاربردهای تراکشن					
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	Li-Ion	Ni-MH	Pb-Ac	پارامتر
۱۱ V	ولتاژ قطع دشارژ	۱۴٫۸ V	ولتاژ نامی	۹۳	۸۰	۸۵	بهره
				۱۵۰-۲۵۰	۲۰۰	۵۰-۷۰	دانسیته انرژی [Wh/l]
۱۶٫۸ V	ولتاژ قطع شارژ	۱۰۵۰۰ mAh	ظرفیت نامی	۱۰۰-۲۰۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	انرژی ویژه [Wh/kg]
				۸۰۰-۳۰۰۰	۱۳۰۰-۵۰۰	۳۰۰	توان ویژه [W/kg]
۲۵۰ A (۷ sec)	جریان حداکثر	۱۲۱ A	جریان دشارژ نامی	۵۵ تا -۲۰	-۲۰ تا ۵۰	-۳۰ تا ۶۰	دمای کاری [°C]
				۱-۵	۲۰	۴-۸	خود دشارژی [%/month]
			وزن هر عدد	< ۲۵۰۰	> ۲۵۰۰	۲۰۰	تعداد سیکل‌ها
mm۱۲۷×۳۷×۱۲۷	ابعاد	۱۰۳۰ g		۵۰-۷۵	۲۰	۱۰	قیمت [\$/kW]

شکل (۱۲) مشخصات شارژ و دشارژ باتری مورد استفاده را نمایش می‌دهد. توان دشارژ نامی مجموعه باتری‌ها ۲۳٫۲ kW است که برای حالت گذرا می‌تواند به مقدار ۴۸ kW نیز برسد که این مقدار فراتر از نیاز حداکثر توان موتور یعنی ۳۰ kW است. سیستم کنترل هیبرید خودرو (HCU) نیازمند دانستن وضعیت شارژ باتری (SOC) می‌باشد. برای تعیین SOC باتری روش‌های مختلفی وجود دارد. یک روش با استفاده از منحنی دشارژ باتری شکل (۱۳) است که با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ باتری حاصل می‌شود و البته روش دقیقی نیست. روش دیگر بر مبنای اندازه‌گیری آمپرساعت (توسط حسگر جریان) و پردازش در میکرو است. می‌توان از تلفیق دو روش فوق به روشی با خطای کمتر دست یافت [۵]. شکل (۱۳) باتری‌های لیتیم-یون پلیمر مورد استفاده در خودروی هیبریدی شهاب را نشان می‌دهد که در صندوق عقب این خودرو قرار داده می‌شوند. برای شارژ باتری‌ها از تغذیه AC، یک شارژر به نحوی طراحی گردیده است که باتری‌ها را در دو مود جریان ثابت/ولتاژ ثابت مطابق توصیه سازنده باتری شارژ می‌نماید. الگوریتم شارژ بدین گونه است که باتری با جریان ثابت (در روش استاندارد ۵۰۲۵ mA و در روش سریع ۱۰۰۵۰ mA) شارژ می‌شود تا ولتاژ باتری به ۱۶٫۸ V برسد. سپس باتری با ولتاژ ثابت ۱۶٫۸ V شارژ می‌شود تا زمانی که جریان کمتر از ۰٫۵۰۳ mA گردد. عملیات شارژ، دشارژ، اعلام خطا و تخمین حالت هر باتری (SOC) توسط سیستم مدیریت باتری (BMS) انجام می‌شود. برای هر باتری یک برد BMS طراحی شده است که اگر باتری به هر دلیل دچار مشکل شد، از مدار خارج شود. تصویر (۱۴) یک نمونه از برد BMS طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲) مشخصه‌های شارژ و دشارژ باتری‌های مورد استفاده



شکل ۱۴) برد BMS طراحی شده برای هر باتری در شهاب ۲



شکل ۱۳) جانمایی باتری و شارژر خارجی در خودروی شهاب ۲

### سیستم‌های الکتریکی جانبی خودرو

در سواری هیبرید طراحی شده، علاوه بر سیستم‌های الکتریکی جانبی متنوعی که در خودروی پراید معمولی وجود دارد، پارامترهای دیگری نیز نشان داده شوند که عبارتند از: مود کاری خودرو، میزان ولتاژ باتری‌های قدرت (باس DC)، دمای موتور الکتریکی و اینورتر، rpm موتور الکتریکی، زمان باقیمانده تا خالی شدن باتری‌ها، میزان شارژ باتری‌ها، جریان موتور. اطلاعات پارامترهای ذکر شده از واحدهای مرتبط HCU، BMS، و درایو جمع‌آوری شده و توسط سخت‌افزارهای مناسب روی نمایشگر دیجیتالی روی پانل جلویی خودرو نمایش داده می‌شوند. ارتباط بین این واحد و واحدهای دیگر به هر دو صورت آنالوگ و دیجیتال است. در مواردی نظیر ارتباط با درایو از پروتکل CAN استفاده می‌شود [۵].

### سیستم کنترل انرژی خودرو

#### واحد کنترل موتور احتراقی (ECU)

به‌دنبال انتخاب موتور بنزینی خودروی پراید به‌عنوان موتور استفاده شده در خودروی هیبرید، از بین پنج سیستم کنترل موتور (ECU) این خودرو، سیستم انژکتوری با کیت واحد کنترل زیمنس انتخاب شد. واحد ECU از طریق اطلاعات و سیگنال‌های فراهم شده به وسیله حسگرها، برای تنظیم موتور در وضعیت بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این واحد دو

کارکرد اصلی یعنی مدت بازماندن سوخت‌پاش‌ها و تنظیم زمان جرقه‌زنی را کنترل می‌کند. در شکل (۱۵)، مدار داخلی این واحد نمایش داده شده است. برخی از حسگرها و عملگرهای این سیستم عبارتند از حسگر دما و فشار هوا، حسگر دمای مایع خنک‌کننده، حسگر وضعیت دریچه‌گاز، حسگر دور موتور و موقعیت زاویه میل‌لنگ، حسگر موقعیت میل سوپاپ، حسگر سرعت خودرو، حسگر اکسیژن، حسگر ضربه (کوبش)، شیر برقی کنسیرتر، کلید اینرسی یا کلید قطع کن، موتور مرحله‌ای، رله دوپل، کوئل و انژکتور.

#### واحد کنترل هیبرید خودرو (HCU)

در خودروی هیبرید موازی بسته به نوع کوپلینگ موتورهای الکتریکی و احتراقی نسبت به یکدیگر، موتور الکتریکی می‌تواند فقط جهت کار در سرعت‌های پایین، کمک به موتور احتراقی در ایجاد سرعت و شتاب حداکثر و یا کار در نواحی کم بازده موتور احتراقی به کار رود. در این راستا، واحد کنترل هیبرید یا HCU وظیفه نظارت بر انتقال توان بین اجزای مختلف سیستم نیرو محرکه خودرو شامل دو بخش مکانیکی و الکتریکی را برعهده داشته و در واقع کنترلر اصلی خودرو می‌باشد. در این پروژه، راهبردهای متفاوت مورد استفاده در خودروهایی هیبرید برقی بررسی شدند [۱۴،۱۵]. در نهایت، با توجه به انتخاب آرایش موازی از روش ترکیبی کنترل سطح شارژ باتری و کنترل با روشن و خاموش کردن موتور احتراقی استفاده می‌گردد چرا که کنترل سطح شارژ باتری برای سرعت‌های پایین و سیکل درون شهری و کنترل با خاموش و روشن کردن موتور احتراقی برای سیکل بین شهری و خارج از شهر مناسب‌تر است [۱۶،۱۷].

واحد HCU با توجه به اطلاعاتی که از سرعت، وضعیت پدال گاز، وضعیت ترمز، وضعیت پدال کلاچ و میزان شارژ باتری‌ها به دست می‌آورد فرمان‌های مناسب را برای موتور الکتریکی، موتور احتراقی و باتری‌ها ارسال می‌نماید. در طراحی انجام شده سعی شده که تغییراتی در واحد کنترل موتور بنزینی (ECU) صورت نگیرد زیرا این واحد پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. اطلاعاتی چون وضعیت پدال گاز، ترمز و سرعت خودرو را می‌توان به‌صورت مستقیم از حسگرها دریافت کرد. به‌همین منظور برای تعیین وضعیت پدال گاز از سیگنال حسگر وضعیت دریچه‌گاز (TPS)، برای سرعت خودرو از حسگر (VSS) استفاده می‌شود و همچنین اطلاعات وضعیت شارژ (SOC) از واحد سیستم مدیریت باتری (BMS) دریافت خواهد شد. برای تعیین فشرده شدن پدال ترمز و کلاچ نیز میکرو سوئیچی در زیر پدال قرار داده می‌شود تا وضعیت آن را به HCU ارسال نماید [۵].

برای این خودرو چهار مود کاری مختلف (احتراقی، الکتریکی، شتاب‌گیری و هیبرید) طراحی شده است [۱۶]. با توجه به وضعیت سوئیچ خودرو و کلید سه وضعیتی که روی داشبورد قرار داده می‌شود، راننده می‌تواند مودها را به دلخواه انتخاب نماید. واحد کنترل هیبرید نیز با تشخیص محل سوئیچ و کلید سه وضعیتی به مود کاری مربوطه وارد شده و دستورات لازم را ارسال می‌نماید. در اولین مود، خودرو به صورت احتراقی عمل می‌کند. در این حالت، کلید در وضعیت ۱ قرار دارد و راننده

با سوئیچ موتور احتراقی را روشن نماید. در مود دوم (تمام الکتریکی)، کلید در وضعیت ۲ قرار دارد. در این حالت، اگر موتور احتراقی توسط راننده روشن گردد، خودرو وارد مود کاری سوم یعنی مود شتاب‌گیری خواهد شد. اگر کلید در وضعیت ۳ قرار گیرد، خودرو به صورت هیبرید عمل می‌کند و الگوریتم کنترلی مورد نظر برای بهینه بودن خودرو را اجرا خواهد نمود.

در مود احتراقی، فقط موتور احتراقی کار می‌کند. موتور الکتریکی توانی را برای حرکت خودرو ایجاد نمی‌کند و بواقع خلاص است. از این حالت می‌توان در موقعیت‌هایی نظیر حرکت در آزادراه استفاده کرد که راننده باید با سرعت بالا حرکت کند و نیاز به کار در حالت موتور الکتریکی ندارد. موتور احتراقی نیز در این حالت در نقطه کار بهینه خود کار می‌کند. همچنین سوئیچی نیز روی داشبورد قرار داده شده است تا در صورت نیاز توسط راننده فعال گردد تا موتور الکتریکی به صورت ژنراتوری کار کند و باتری‌ها را شارژ نماید.

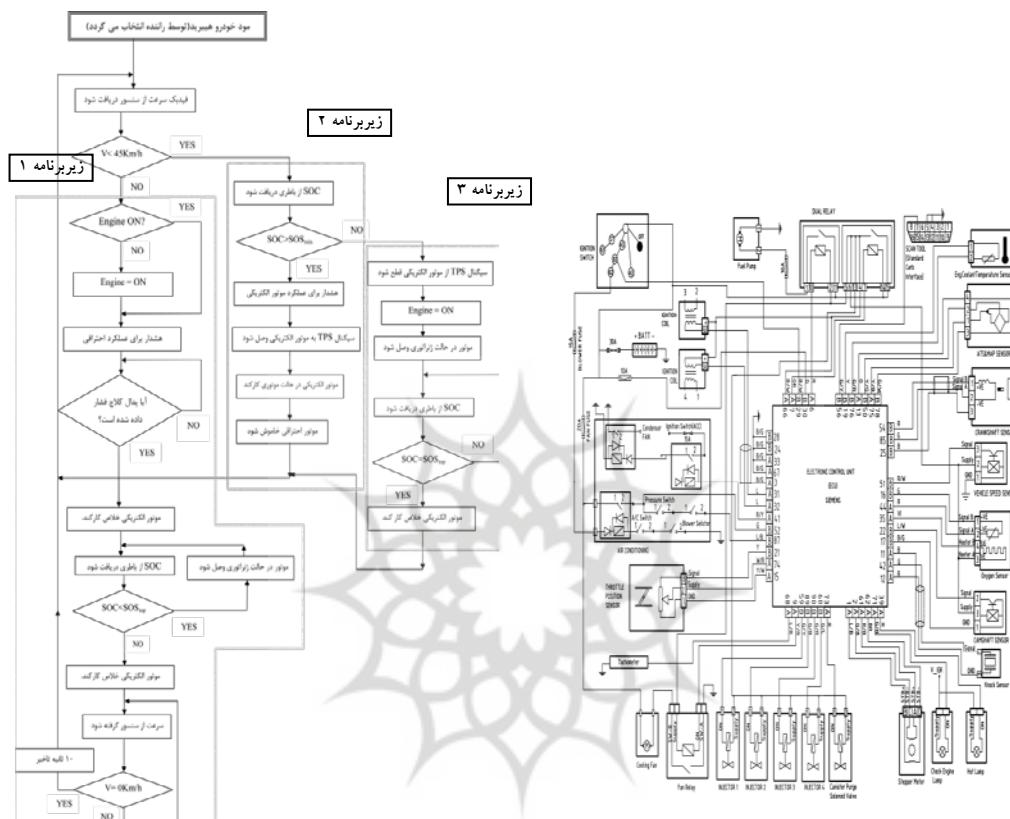
در مود الکتریکی، خودرو تا زمانی که شارژ دارد، به صورت الکتریکی حرکت می‌نماید و در صورت اتمام شارژ باتری‌ها، موتور الکتریکی به صورت خلاص عمل خواهد نمود. در این حالت، پس از دریافت میزان شارژ اگر از مقدار حداقل بیشتر باشد، متناسب با فشار پدال گاز دور موتور الکتریکی و سرعت خودرو تغییر می‌نماید.

در مود شتاب‌گیری، هر دو موتور الکتریکی و احتراقی محرک هستند. پس از آنکه این مود توسط راننده انتخاب شد، موتور احتراقی روشن شده و میزان شارژ باتری با حداقل خود مقایسه می‌شود. اگر سطح شارژ مناسب بود، موتور الکتریکی فعال خواهد شد و در غیر این صورت، فقط موتور احتراقی توان شتاب‌گیری را تامین خواهد نمود.

در مود هیبرید، واحد کنترل هیبرید مانند الگوریتم نشان داده شده در شکل (۱۶) عمل می‌کند. حال اگر سرعت خودرو از سرعت تعیین شده ( $40 \text{ Km/h}$ ) کمتر باشد و شارژ باتری نیز از حداقل شارژ مورد نظر در باتری‌ها بیشتر باشد، زیر برنامه ۲ اجرا می‌شود که طی آن، موتور الکتریکی فقط کار می‌کند. زیر برنامه ۲ را حالت کار در سرعت پایین یا حالت ترافیک می‌توان نامید. این زیر برنامه اجرا می‌شود تا زمانی که یکی از دو شرط سرعت یا سطح شارژ باتری نقض گردد. اگر سرعت خودرو از  $40 \text{ Km/h}$  فراتر رود، موتور احتراقی روشن و به راننده اعلام می‌شود که موتور احتراقی روشن شده و خودرو از حالت کار موتور الکتریکی خارج شده است. سپس واحد کنترل هیبرید منتظر می‌ماند که راننده به این تغییر حالت پاسخ دهد یعنی پدال کلاچ را فشار داده و موتور الکتریکی خلاص کار کند.

این حالت بدین منظور قرار داده شده تا بلافاصله پس از افزایش سرعت و عبور از محدوده مورد نظر، خودرو خلاص نشود و عملکرد خودرو تحت اختیار راننده قرار گیرد. در این حالت، در صورت نیاز، باتری‌ها می‌توانند شارژ شوند. اگر شرط شارژ باتری نقض گردد یعنی شارژ باتری تمام شده باشد، زیر برنامه ۳ اجرا خواهد شد که در آن سیگنال فرمان از موتور الکتریکی جدا خواهد شد و موتور احتراقی روشن می‌شود. سپس برای آنکه باتری‌ها دوباره شارژ شوند و برای سیکل‌های بعدی شارژ مورد نیاز را داشته باشد، موتور در حالت ترمزی بازیاب انرژی عمل خواهد نمود تا باتری به صورت کامل شارژ

شود. پس از آن موتور الکتریکی در حالت خلاص قرار خواهد گرفت.



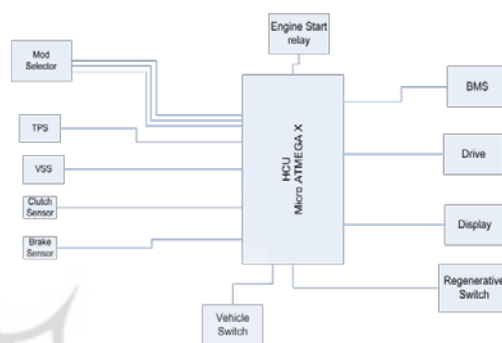
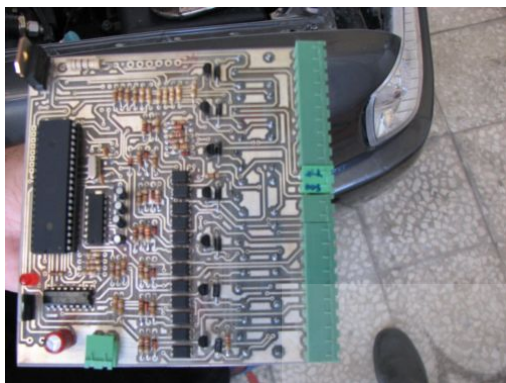
شکل ۱۵) مدار داخلی ECU نوع زیمنس موتور احتراقی پروژه (شکل ۱۶) الگوریتم کنترل در واحد HCU در مده هیبرید عملکرد ترمزی با فشار پدال ترمز توسط راننده فعال می‌گردد. برای امنیت بیشتر ترمز الکتریکی و مکانیکی همزمان اعمال می‌شوند. با فشار پدال، وقفه پدال ترمز فعال شده و موتور الکتریکی در حالت ژنراتوری کار می‌کند و انرژی ترمزی در باتری‌ها ذخیره می‌شود.

هدف از اینکه برای این خودرو مدهای کاری متفاوتی طراحی شده این است که خودرو علاوه بر اینکه به صورت هیبرید عمل کند توسط راننده امکان انتخاب حالت کاری متفاوت باشد تا کارایی خودرو بیشتر باشد. یعنی راننده خواهد توانست علاوه بر یک خودرو هیبرید، یک خودرو الکتریکی و احتراقی به صورت مجزا نیز در اختیار داشته باشد.

مطابق شکل (۱۷)، واحدهای سخت‌افزاری مرتبط با HCU عبارتند از BMS، درایو الکتریکی، نمایشگر LCD در داشبورد، سوئیچ، کلید سلکتوری، ECU، حسگرهای پدال کلاچ، ترمز، گاز و سرعت خودرو. پیاده‌سازی سخت‌افزاری واحد



HCU نیز با استفاده از میکرو کنترلر AVR سری 90S انجام گردیده است که مدار سخت‌افزاری آن در شکل (۱۸) قابل مشاهده است.



شکل ۱۷) ارتباط واحد HCU با بخش‌های مختلف خودرو

شکل ۱۸) مدار سخت‌افزاری واحد HCU خودروی شاهب ۲

### نتایج آزمایش میدانی خودروی شاهب ۲

شکل (۱۹) تصویر خودروی هیبریدی شاهب ۲ را نشان می‌دهد که البته طبق قوانین مسابقه facelift روی آن انجام شده است. لازم به ذکر است خودروی شاهب ۲ در سومین مسابقات ملی طراحی خودرو در سال ۱۳۹۱ توانست از میان ۴۷ تیم شرکت کننده از دانشگاه‌های کشور حائز رتبه سوم شود.



شکل ۲۰) دانشجویان و اساتید تیم سازنده خودروی هیبریدی شاهب ۲



شکل ۱۹) تصویر خودروی هیبریدی شاهب ۲

جدول (۶)، اطلاعات نهایی ساخت خودروی هیبریدی شاهب ۲ و نتایج برخی آزمایش‌های میدانی را نشان می‌دهد. وزن خودرو در حدود ۱۲ درصد افزایش یافته است. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، با توجه به اینکه خودرو برای شرکت در مسابقه طراحی گردیده بود، نتایج برخی آزمایش‌های استاندارد خودروهای هیبریدی آورده نشده است. برای نمونه، سیکل حرکتی خودرو سبک خاصی بوده که برای مقایسه خودروهای هیبریدی مسابقه باید از آن استفاده می‌شد. لذا برای مقایسه این خودرو با سایر خودروهای هیبریدی تجاری باید از آزمایش‌های استاندارد درون شهری و بیرون شهری نظیر FTP75 و UDSS استفاده نمود. همچنین برد خودرو در جدول زیر تنها برای دو لیتر بنزین می‌باشد و استفاده از ظرفیت کامل باک سوخت و حرکت خودرو طبق سیکل حرکتی استاندارد برد حقیقی خودرو را مشخص می‌کند و در آن هنگام می‌توان به ارزش هیبریدی نمودن پراید مخصوصاً در سیکل حرکت شهری که انرژی زیادی در حین ترمز تلف می‌شود، پی برد. همچنین استفاده از راهبردهای کنترل انرژی پیشرفته‌تر نظیر روش هوشمند فازی هم در کاهش بیشتر مصرف سوخت و کاهش آلودگی و افزایش بهره موتور احتراقی موثر است [۱۸].

جدول ۶) مشخصات خودروی هیبریدی شاهب ۲

واحد	مقدار	پارامتر
کیلوگرم	۹۲۰	وزن خودرو
کیلوگرم	۵۱۲	بار روی محور جلو
کیلومتر	۴۴,۲۵	برد هیبریدی خودرو با دو لیتر سوخت
کیلومتر	۱۲,۳۰	برد تمام برقی خودرو
ثانیه	۱۷	شتاب ۰ تا ۴۰۰ متر خودرو
کیلومتر بر ساعت	۱۲۷	سرعت خودرو
درصد	۴۰,۵	شیب روی بیشینه خودرو
کیلووات	۴۵	توان موتور احتراقی
کیلووات	۲۲	توان موتور الکتریکی

## نتیجه گیری

در این مقاله، به چگونگی طراحی خودروی هیبریدی شاهب ۲ در دانشگاه کاشان مطرح و محاسبه و انتخاب اجزای دو بخش مکانیکی و الکتریکی این خودرو مورد بحث قرار گرفت. انتخاب خودروی پراید برای هیبرید نمودن با توجه به تولید انبوه این خودرو و در دسترس بودن تمام دانش فنی ساخت و تولید آن در کشور بوده است. آرایش موازی TTR نیز برای تبدیل آسان‌تر خودروی احتراقی پراید به یک خودروی هیبریدی مورد استفاده قرار گرفته است. البته استفاده از آرایش‌های موازی هم‌محور و به کار بردن روش‌های کنترل انرژی پیشرفته‌تر نظیر روش‌های هوشمند بمراتب عملکرد این خودرو را بهتر می‌کند. همچنین با توجه به اینکه خودرو مزبور برای شرکت مسابقات طراحی شده بود، برخی از آزمایش‌ها و

ملاحظات خودروهای هیبرید تجاری در آن جای کار بیشتری دارد. علاوه بر آن، انتخاب برخی اجزای ماشین مانند باتری بر اساس قوانین طراحی صورت گرفته است و در یک خودروی هیبرید تجاری، انتخاب‌ها می‌تواند بهتر انجام گردد.

از محدودیت‌ها و نقاط ضعف خودروی طراحی شده می‌توان به محدودیت ساختار TTR در شارژ درجای باتری‌ها اشاره نمود که استفاده از آرایش موازی هم‌محور این تقیصه را رفع می‌کند. در استفاده از آرایش موازی هم‌محور به دلیل فضای کم صندوق جلوی خودرو، استفاده از موتورهای شار محوری نوع PMDC، BLDC و یا PMSM مناسب‌تر است. انتخاب نوع و ظرفیت باتری نیز در افزایش برد خودرو باید مورد توجه قرار گیرد. روش کنترل on/off مورد استفاده در این طرح نسبت به سایر روش‌ها نظیر کنترل فازی و روش‌های بهینه از بازدهی و قابلیت کمتری برخوردار است که می‌تواند در طرح‌های تجاری جایگزین گردد. استفاده از موتور و درایو خنک شونده با جریان هوا به جای سیستم خنک‌شونده با آب مشکلات گردش و مخزن آب خنک‌سازی را ندارد و نگهداری و بهره‌برداری از سیستم را آسان‌تر می‌سازد. مساله دیگری که جای کار دارد، استفاده از گیربکس CVT به جای گیربکس با دنده ثابت برای بکارگیری موتور الکتریکی در تمامی سرعت‌هاست. مساله مهم دیگری که هنگام استفاده از موتورهای آهنربای دائم در خودروهای برقی و هیبریدی به وجود می‌آید، ترمز شدید موتور بواسطه القای جریان‌های گردابی در بدنه موتور بواسطه شار آهنربای دائم موتور است. برای حل این مشکل، بکارگیری کلاچ الکترونیکی برای اتصال یا جداسازی موتور در هنگام عملکرد فقط احتراقی و یا هیبریدی ضروری است.

این پروژه و مشکلات و محدودیت‌های ظاهر شده در حین انجام آن می‌تواند راهنمایی برای انجام پروژه‌های آتی در زمینه خودروهای پاک و یا کم‌مصرف باشد. قیمت تمام شده این خودرو در زمان انجام نسبت به خودروی پراید بنزینی تقریباً ۷۰ درصد بیشتر است که این رقم می‌تواند در انبوه‌سازی و بهینه‌سازی کاهش یابد. تجربه بدست آمده از ساخت این خودرو نشان می‌دهد که گلوگاه انجام چنین پروژه‌هایی، قسمت محرکه الکتریکی شامل موتور و باتری‌هاست که فناوری ساخت آن در کشور وجود نداشته و پرداختن به مبحث تولید خودروهای هیبریدی بدون در نظر گرفتن این مسائل، غیراقتصادی است.

### سپاسگزاری

این مقاله حاصل طرح پژوهشی شماره ۵۲۹۷۱ دانشگاه کاشان و تحت حمایت شرکت سایپا کاشان و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان بوده است. لذا از حمایت‌های بی‌دریغ ریاست محترم دانشگاه کاشان، معاونت پژوهشی این دانشگاه و همچنین پشتیبانی موثر شرکت سایپا کاشان کمال سپاس را داریم. همچنین از تیم دانشجویان بخش‌های مکانیک و برق این پروژه که مجریان اصلی پروژه ساخت خودروی هیبریدی شهاب ۲ بودند تشکر و قدردانی می‌گردد (تصویر ۲۰).

## منابع

- [1] Salisa, A.R., Zhang, N., Zhu, J.G., "A Comparative Analysis of Fuel Economy and Emissions between a Conventional HEV and the UTS PHEV", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 60, No. 1, pp. 44-54, 2011.
- [2] Moghbeli, H., Halvaei Niasar, A., Langari, R., "New Generation of Passenger Vehicles: FCV or HEV?", Proceeding of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT06), pp.452-459, Mumbai, India, Dec. 2006.
- [3] [http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/hybrid/](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/hybrid/)
- [4] Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A., Gay S.; *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press, Nov. 2004, USA.
- [5] گلابی، سعید، حلوائی نیاسر، ابوالفضل، طرح پژوهشی طراحی و ساخت خودروی هیبرید برقی، قرارداد شماره ۵۲۹۷۱، معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان، دانشگاه کاشان، آبان ۱۳۹۰.
- [6] Iqbal Husain, *Electric and Hybrid Vehicles; Design Fundamentals*, CRC Press, 2003.
- [7] Smith J. H., *An Introduction to Modern Vehicle Design*, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [8] Emadi A., Ehsani M., *Vehicular Electric Power Systems, Land, Sea, Air, and Space Vehicles*, Marcel Dekker, 2004.
- [9] [www.ev-motor.cn](http://www.ev-motor.cn)
- [10] Emadi A., *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, CRC Press, 2005.
- [11] *TMS320LF240xA DSP Controllers Reference Guide—System and Peripherals* (in Texas Instruments Incorporated), Literature no. SPRU357B. Dallas, TX, Dec. 2001.
- [12] Vyas A.D., Henry N.G., Santini D. J., Anderson J.L., "Batteries for Electric Drive Vehicles: Evaluation of Future Characteristics and Costs through a Delphi Study", SAE International Spring Fuels and Lubricants Meeting, Detroit, Michigan, 1997.
- [13] [www.gitabattery.com](http://www.gitabattery.com)
- [14] Gao Y., Rahman K.M., Ehsani M., "The Energy Flow Management And Battery Energy Capacity Determination For The Drive Train Of Electrically Peaking Hybrid", SAE Publication SP-1284, 1997, Paper No. 972647.
- [15] Halvaei Niasar, A., Moghbelli, H., Vahedi A., "Design Methodology of Drive Train for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle (SP-HEV) and its Power Flow Control Strategy", IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2005), pp. 1549-1554, San Antonio, TX, USA, May 2005.
- [16] Mathews, J. C., Walp, K. J., Molen, G.M., "Development and Implementation of a Control System for a Parallel Hybrid Powertrain", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '06, pp. 1-6, 2006.
- [17] Muraleedharakrup, G., Poxon, J., McGordon, A., Jennings, P., "Development of a Lightweight Plug-in Hybrid Electric Vehicle Demonstrator", The 25<sup>th</sup> World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS-25), Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010.
- [18] Fallahi, N., Halvaei Niasar, A., "Intelligent Energy Management Strategy for a Separated-Axle Parallel Hybrid Electric Vehicle," Intelligence Systems in Electrical Engineering Journal, University of Isfahan, Isfahan, Vol. 4, No. 4, Winter 2014, pp. 51-62.