

دانشکده فنی و مهندسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی مکانیک، گرایش طراحی کاربردی

عنوان

مدل سازی و طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی

استادان راهنما

دکتر محمد رضا حائری یزدی و دکتر وحید اصفهانیان

پژوهشگر

علی صفائی

شهریور ۱۳۹۱

نام خانوادگی دانشجو: صفایی

نام: علی

عنوان: مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی

استادان راهنمای: دکتر محمدرضا حائری یزدی و دکتر وحید اصفهانیان

گرایش: طراحی کاربردی

رشته: مهندسی مکانیک

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

دانشگاه فنی و مهندسی

تعداد صفحات: ۱۰۸

دانشگاه: تهران

تاریخ فارغ‌التحصیلی: شهریور ۱۳۹۱

واژگان کلیدی: هیبرید هیدرولیک، اتوبوس، استراتژی کنترل هوشمند، مدل‌سازی

چکیده

استفاده از تکنولوژی هیبرید، ایندهای مناسب جهت کاهش مصرف سوخت در خودروها می‌باشد. در این پایان‌نامه یک سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک برای یک اتوبوس شهری طراحی و مدل‌سازی شده‌است. سیستم قوای محرکه شامل یک موتور احتراق داخلی به عنوان مؤلفه‌ی اول تولید قدرت و یک پمپ-موتور هیدرولیکی به عنوان مؤلفه‌ی دوم تولید قدرت می‌باشد. پمپ-موتور هیدرولیک امکان اعمال گشتاور منفی بر چرخ‌های خودرو و بازیابی انرژی ترمی را دارد. در سیستم حاضر، آکومولاتورهای هیدرولیکی به عنوان منع ذخیره‌ی انرژی استفاده شده‌اند. در مرحله‌ی طراحی سیستم، بیشینه‌ی توان موردنیاز برای هریک از منابع تولید قدرت تعیین شده‌است. پس از طراحی و انتخاب المان‌های مختلف سیستم قوای محرکه، متناظر با هریک از المان‌ها، یک مدل در نرم‌افزار MATLAB/Simulink ایجاد شده‌است. مدل‌سازی با لحاظ نمودن بازدهی المان‌ها انجام گرفته‌است. با ترکیب مدل‌های ایجاد شده، یک مدل جامع برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک ایجاد شده‌است. به‌منظور مدیریت گشتاور در سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید دو استراتژی کنترل طراحی شده‌است. ابتدا یک استراتژی کنترل قانون‌مند که براساس دید فرد طراح نسبت به سیستم طراحی می‌شود، ارائه شده‌است. سپس روند طراحی استراتژی کنترل هوشمند بطور مفصل بیان شده‌است. این استراتژی کنترل با استفاده از یک واحد شناسایی سیکل، شباهت هر سیکل رانندگی به چهار سیکل رانندگی استاندارد را تعیین می‌کند. واحد شناسایی سیکل شامل یک الگوریتم انتخاب مشخصه و یک الگوریتم خوشبندی فازی می‌باشد. سیگنال کنترلی مناسب با استفاده از ترکیب خطی خروجی چهار کنترلر بهینه متناظر با هریک از سیکل‌های رانندگی استاندارد ایجاد شده‌است. هریک از جمله‌ها در این ترکیب خطی با استفاده از درجات شباهت تعیین شده توسط واحد شناسایی سیکل وزن‌دهی شده‌است. کنترلرهای بهینه متناظر با چهار سیکل رانندگی استاندارد با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی بدست آمده‌اند. این کنترلرهای

با استفاده از مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی مدل‌سازی و به صورت آنلاین استفاده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که عملکرد شتاب‌گیری اتوبوس هیبرید نسبت به اتوبوس متعارف بهبود یافته است. در مقابل، سرعت اتوبوس هیبرید در طی مسافت با شبیث ثابت بیشتر از صفر، کمتر از سرعت اتوبوس متعارف در شرایط مشابه است. همچنین استراتژی کنترل هوشمند با بازیابی انرژی ترمزی بیشتر، موجب کاهش مصرف سوخت اتوبوس هیبرید نسبت به اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی کنترل قانون‌مند شده است.

این پیمان نامه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم.

مشکر و قدردانی

از راهنمایی‌های استاد گرام دکتر حائری یزدی و دکتر اصفهانیان و هم‌فکری‌های دوستان عزیزم مسعود مسیح تهرانی و حسن نهضتی در مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران صمیمانه تشکر می‌کنم.

فهرست مطالب

| | | |
|----|------|--|
| ۱ | ۱ | مقدمه |
| ۲ | ۱-۱ | سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک |
| ۶ | ۲-۱ | استراتژی کنترل هوشمند |
| ۸ | ۳-۱ | هدف از انجام پروژه‌ی حاضر |
| ۱۱ | ۲ | طراحی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی |
| ۱۲ | ۱-۲ | مشخصات کلی خودروی موردنظر و حدود عملکردی |
| ۱۲ | ۲-۲ | توان موردنیاز خودرو در شرایط مختلف عملکردی |
| ۱۴ | ۳-۲ | سایزینگ المان‌های موجود در ساختار قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک موازی |
| ۱۶ | ۴-۲ | ساختار نهایی سیستم قوای محرکه‌ی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی |
| ۱۸ | ۳ | مدل‌سازی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی |
| ۲۰ | ۱-۳ | سیکل رانندگی |
| ۲۰ | ۲-۳ | مدل راننده |
| ۲۲ | ۳-۳ | مدل موتور احتراق داخلی |
| ۲۵ | ۴-۳ | مدل گیربکس اتوماتیک |
| ۲۸ | ۵-۳ | مدل پمپ-موتور هیدرولیکی |
| ۳۱ | ۶-۳ | مدل آکومولاتور |
| ۳۳ | ۷-۳ | استراتژی کنترل قانونمند |
| ۳۶ | ۸-۳ | مدل کنترلر مرکزی هیبرید |
| ۳۷ | ۹-۳ | مدل کوپلینگ |
| ۳۷ | ۱۰-۳ | مدل دینامیک خودرو |
| ۳۸ | ۱۱-۳ | تأثیید صحت مدل‌سازی |
| ۳۹ | ۱۱-۳ | - تأثیید مدل آکومولاتور |
| ۳۹ | ۱۱-۳ | - تأثیید مدل پمپ-موتور هیدرولیکی |
| ۴۰ | ۱۱-۳ | - تأثیید مدل گیربکس و موتور احتراق داخلی |

| | |
|------|--|
| ٤٠ | ۱۲-۳ سایزینگ آکومولاتور |
| ٤٢ | ۱۲-۳ - تعیین حجم سیال بهینه مورد نیاز |
| ٤٦ | ۱۲-۳ - تعیین ظرفیت نامی مناسب برای آکومولاتور |
| | |
| ٤٨ | ٤ طراحی استراتژی کنترل هوشمند |
| ٤٩ | ۱-۴ طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه ریزی دینامیکی |
| ٤٩ | ۱-۱-۴ الگوریتم برنامه ریزی دینامیکی چیست؟ |
| ۵۰ | ۱-۲-۴ کلیات الگوریتم برنامه ریزی دینامیکی استفاده شده در این پایان نامه |
| ۵۲ | ۱-۳-۴ جزئیات کد نوشته شده برای اجرای الگوریتم برنامه ریزی دینامیکی |
| ۵۴ | ۴-۱-۴ معرفی چهار سیکل رانندگی استاندارد |
| ۵۶ | ۵-۱-۴ بررسی کیفیت عملکرد الگوریتم برنامه ریزی دینامیکی |
| ۵۸ | ۲-۴ طراحی مجموعه ای از شبکه های عصبی برای مدل سازی استراتژی کنترل بهینه |
| ۵۹ | ۱-۲-۴ آماده سازی داده ها جهت ایجاد مجموعه مدل شبکه عصبی |
| ۶۰ | ۲-۲-۴ ساختار مجموعه مدل شبکه عصبی |
| ۶۳ | ۳-۲-۴ بررسی کیفیت عملکرد مجموعه مدل شبکه عصبی |
| ۶۵ | ۳-۴ طراحی واحد شناسایی سیکل رانندگی |
| ۶۶ | ۱-۳-۴ الگوریتم خوشه بندی فازی |
| ۶۹ | ۲-۳-۴ الگوریتم انتخاب مشخصه |
| ۷۲ | ۳-۳-۴ بررسی کیفیت عملکرد واحد شناسایی سیکل |
| ۷۳ | ۴-۴ ساختار نهایی استراتژی کنترل هوشمند |
| | |
| ٧٨ | ۵ نتایج شبیه سازی ها |
| ٨٥ | ۶ جمع بندی و تحقیقات آتی |
| ٨٨ | الف بلوک های مربوط به مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی در نرم افزار MATLAB/Simulink |
| | |
| ٩٦ | مراجع |
| ۱۰۱ | واژه نامه انگلیسی به فارسی |

فهرست شکل‌ها

| | | |
|----|--|------|
| ۱ | سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک سری [۱] | ۱-۱ |
| ۲ | سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک موازی [۱] | ۲-۱ |
| ۳ | پمپ-موتور پیستونی هیدرولیک - کارکرد پمپی | ۳-۱ |
| ۴ | پمپ-موتور پیستونی هیدرولیک - کارکرد موتوری | ۴-۱ |
| ۵ | نحوه‌ی اجرای الگوریتم استراتژی کنترل هوشمند به صورت آنلاین | ۵-۱ |
| ۶ | شماتیک سیستم قوای محرکه‌ی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی | ۶-۲ |
| ۷ | روش‌های مدل‌سازی خودرو. (الف) رویه‌عقب، (ب) رویه‌جلو | ۷-۳ |
| ۸ | مدل رویه‌جلوی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink | ۸-۳ |
| ۹ | (الف) سیکل رانندگی مودال NEDC، (ب) سیکل رانندگی گذرای FTP | ۹-۳ |
| ۱۰ | مدل راننده در Simulink | ۱۰-۳ |
| ۱۱ | کنترلر PID راننده | ۱۱-۳ |
| ۱۲ | نمودار مصرف سوخت موتور OM906LA | ۱۲-۳ |
| ۱۳ | منحنی عملکرد موتور OM906LA [۳۱] | ۱۳-۳ |
| ۱۴ | منحنی توان مقاوم موتور OM906LA [۳۲] | ۱۴-۳ |
| ۱۵ | نمودار روند تعویض دنده در گیریکس اتوماتیک [۳۳] | ۱۵-۳ |
| ۱۶ | نمودار نسبت گشتاور بر حسب نسبت سرعت در مبدل گشتاور | ۱۶-۳ |
| ۱۷ | نمودار گشتاور پمپ بر حسب نسبت سرعت در مبدل گشتاور | ۱۷-۳ |
| ۱۸ | نمودار تعیین بازدهی پمپ-موتور هیدرولیک [۳۴] | ۱۸-۳ |
| ۱۹ | نمودار حجم سیال قابل ذخیره‌سازی بر حسب فشارهای کاری سیستم برای آکومولاتور [۳۵] | ۱۹-۳ |
| ۲۰ | فلوچارت استراتژی کنترل قانون‌مند | ۲۰-۳ |
| ۲۱ | نمودار تأیید صحت مدل آکومولاتور | ۲۱-۳ |
| ۲۲ | نمودار تأیید صحت مدل پمپ-موتور در سرعت ۱۸۰۰ rpm | ۲۲-۳ |
| ۲۳ | نمودار تأیید صحت مدل گیریکس و موتور احتراق داخلی | ۲۳-۳ |

| | | |
|-----|---|----|
| ۱-۴ | مرزهای بالا و پایین برای متغیر حالت (SOC) در طول زمان یک سیکل رانندگی | ۵۲ |
| ۲-۴ | فضای حل، استفاده شده برای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی | ۵۳ |
| ۳-۴ | تعیین تصمیم بهینه برای هر گره در هر گام زمانی. این مورد در قسمت دوم از کد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی انجام می‌گیرد. | ۵۴ |
| ۴-۴ | فلوچارت مربوط به الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده | ۵۵ |
| ۴-۴ | چهار سیکل رانندگی استاندارد استفاده شده به عنوان خوش‌های مرجع برای طراحی استراتژی کنترل هوشمند [۲۴] | ۵۶ |
| ۴-۴ | سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل بهینه در سیکل رانندگی Loc/Rod در مقایسه با سرعت سیکل رانندگی مربوطه | ۵۷ |
| ۴-۴ | سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل قانونمند در سیکل رانندگی Loc/Rod در مقایسه با سرعت سیکل رانندگی مربوطه | ۵۸ |
| ۴-۴ | نمودار نقاط عملکردی موتور احتراق داخلی در سیکل Col/Art a-b با اعمال استراتژی کنترل بهینه | ۵۸ |
| ۴-۴ | نمودار نقاط عملکردی موتور احتراق داخلی در سیکل Col/Art a-b با اعمال استراتژی کنترل قانونمند | ۵۹ |
| ۴-۴ | ۱۰-۴ ورودی‌ها و خروجی مجموعه مدل شبکه‌ی عصبی | ۶۰ |
| ۴-۴ | ۱۱-۴ اساختار مجموعه مدل شبکه‌ی عصبی | ۶۱ |
| ۴-۴ | ۱۲-۴ نمونه‌ای از بلوک ایجاد شده جهت استفاده از مجموعه مدل شبکه‌ی عصبی | ۶۲ |
| ۴-۴ | ۱۳-۴ الگوریتم خوش‌بندی فازی C-means | ۶۸ |
| ۴-۴ | ۱۴-۴ روش جستجوی شناور به عنوان یک الگوریتم انتخاب مشخصه | ۷۰ |
| ۴-۴ | ۱۵-۴ مقدار تابع هزینه بر حسب تعداد مشخصات در الگوریتم انتخاب مشخصه | ۷۱ |
| ۴-۴ | ۱۶-۴ سیکل رانندگی نمونه | ۷۵ |
| ۴-۴ | ۱۷-۴ محل قرارگیری مراکز خوش‌ها و سیکل‌های رانندگی نمونه با استفاده از واحد شناسایی سیکل پیشنهاد شده | ۷۶ |
| ۴-۴ | ۱۸-۴ مقادیر ضرائب شباهت برای سیکل Local Road به عنوان ورودی در واحد شناسایی سیکل | ۷۶ |
| ۴-۴ | ۱۹-۴ اساختار استراتژی کنترل هوشمند | ۷۷ |
| ۱-۵ | ۱-۵ مقایسه‌ی درصد بازیابی انرژی ترمیزی در اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی‌های کنترلی هوشمند و قانونمند | ۸۲ |
| ۲-۵ | ۲-۵ مقایسه‌ی درصد استفاده از انرژی ذخیره شده در آکومولاتورها در اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی‌های کنترلی هوشمند و قانونمند | ۸۳ |
| ۳-۵ | ۳-۵ مقایسه‌ی درصد استفاده از انرژی موجود در گازوئیل در اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی‌های کنترلی هوشمند و قانونمند | ۸۳ |

فهرست شکل‌ها

| | |
|--|----|
| ۴-۵ مقایسه‌ی سیگنال‌های کنترلی گشتاور موتور احتراق‌داخلی در استراتژی کنترل هوشمند و قانون‌مند | ۸۴ |
| ۵-۵ مقایسه‌ی سیگنال‌های کنترلی گشتاور پمپ-موتور هیدرولیکی در استراتژی کنترل هوشمند و قانون‌مند | ۸۴ |
| الف-۱ مدل موتور احتراق‌داخلی | ۸۹ |
| الف-۲ مدل گیربکس اتوماتیک | ۹۰ |
| الف-۳ مدل پمپ-موتور هیدرولیک | ۹۱ |
| الف-۴ مدل کنترلر پمپ-موتور هیدرولیک | ۹۲ |
| الف-۵ مدل آکومولاتور هیدرولیکی | ۹۲ |
| الف-۶ مدل کنترلر مرکزی هیبرید | ۹۳ |
| الف-۷ مدل کوپلینگ گشتاور | ۹۴ |
| الف-۸ مدل دینامیک خودرو | ۹۵ |

فهرست جدول‌ها

| | | |
|----|--|-----|
| ۱۲ | مشخصات اتوبوس ۰۴۵۷ | ۱-۲ |
| ۱۳ | قیود شیب‌پیمایی اتوبوس شهری | ۲-۲ |
| ۱۳ | قیود شتاب‌گیری اتوبوس شهری | ۳-۲ |
| ۱۴ | مقادیر توان موردنیاز برای اراضی قیود شتاب‌گیری اتوبوس | ۴-۲ |
| ۱۴ | مقادیر توان موردنیاز برای اراضی قیود شیب‌پیمایی اتوبوس | ۵-۲ |
| ۱۵ | مشخصات پمپ-موتور هیدرولیک محصول شرکت بوش-رکسروت [۳۴] | ۶-۲ |
| ۱۶ | مشخصات آکومولاتور هیدرولیکی محصول شرکت بوش-رکسروت [۳۵] | ۷-۲ |
| ۲۲ | ضرائب کنترلر PID | ۱-۳ |
| ۲۵ | مقادیر ضرائب دندنه‌ی گیریکس اتوماتیک PID | ۲-۳ |
| ۳۶ | پارامترهای حدی در استراتژی کنترل قانون‌مند | ۳-۳ |
| ۴۱ | انتخاب‌های ممکن برای ظرفیت آکومولاتورهای مجموعه | ۴-۳ |
| ۴۳ | مقایسه‌ی مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن | ۵-۳ |
| ۴۴ | مقایسه‌ی شتاب‌گیری در اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن | ۶-۳ |
| ۴۵ | مقایسه‌ی شیب‌پیمایی در اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن | ۷-۳ |
| ۴۶ | مقایسه‌ی حجم سیال موردنیاز در گزینه‌های مختلف | ۸-۳ |
| ۵۷ | مقایسه‌ی مصرف سوخت اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی کنترل‌های قانون‌مند و بهینه | ۱-۴ |
| ۶۱ | حدوده‌ی پارامترهای ورودی و خروجی مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی قبل از نرم‌السازی | ۲-۴ |
| ۶۳ | مقادیر متوسط مربعات خطای mse (mse) ای داده‌های آموزش برای مجموعه‌مدل متناظر با سیکل رانندگی Collector/Arterial a-b | ۳-۴ |
| ۶۳ | مقادیر متوسط مربعات خطای mse (mse) ای داده‌های آموزش برای مجموعه‌مدل متناظر با سیکل رانندگی Collector/Arterial c-d | ۴-۴ |

| | |
|------|--|
| ۵-۴ | مقادیر متوسط مربuat خطا (mse) ای داده‌های آموزش برای مجموعه مدل متناظر با سیکل رانندگی e-f |
| ۶۴ | Collector/Arterial |
| ۴-۶ | مقادیر متوسط مربuat خطا (mse) ای داده‌های آموزش برای مجموعه مدل متناظر با سیکل رانندگی Local Road |
| ۶۴ | Local Road |
| ۷-۴ | مقایسه مقادیر مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک با اعمال استراتژی کنترل بهینه بصورت آفلاین و آنلاین |
| ۶۵ | آفلاین و آنلاین |
| ۸-۴ | مجموعه مشخصات مرجع برای شناسایی یک سیکل رانندگی |
| ۶۶ | مجموعه مشخصات مرجع برای شناسایی یک سیکل رانندگی (ادامه) |
| ۸-۴ | مجموعه مشخصات مرجع برای شناسایی یک سیکل رانندگی توسط الگوریتم انتخاب مشخصه |
| ۶۷ | انتخاب مشخصه |
| ۹-۴ | ۱۰ مشخصه انتخاب شده جهت شناسایی یک سیکل رانندگی توسط الگوریتم انتخاب مشخصه |
| ۷۲ | انتخاب مشخصه |
| ۱۰-۴ | مقادیر درجات عضویت هر سیکل رانندگی در خوش‌های مرجع |
| ۷۳ | مقادیر درجات عضویت هر سیکل رانندگی در خوش‌های مرجع |
| ۱۱-۴ | مقادیر فاصله‌ی هر سیکل رانندگی با مراکز خوش‌های مرجع |
| ۷۹ | ۱-۵ نتایج مقایسه عملکرد شتاب گیری اتوبوس هیبرید و متعارف |
| ۷۹ | ۲-۵ نتایج مقایسه عملکرد شبیه‌سیایی اتوبوس هیبرید و متعارف |
| ۸۰ | ۳-۵ نتایج مقایسه مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف |
| ۸۱ | ۳-۵ نتایج مقایسه مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف (ادامه) |

حروف اختصاری

| | |
|------------|-------------------------------------|
| V | سرعت |
| a | شتاب |
| M | جرم |
| g | شتاب گرانش |
| f_r | مقاومت غلتی |
| ρ_a | چگالی هوا |
| C_d | ضریب درگ هوا |
| A | مساحت |
| i | شیب جاده |
| η | بازده |
| δ | ضریب اعمال جرم مؤثر |
| T | گشتاور |
| P | توان |
| n | سرعت زاویه‌ای |
| v_g | جابجایی زاویه‌ای پمپ-موتور هیدرولیک |
| δp | اختلاف فشار سیال |
| p | فشار سیال |
| q_v | دیسیال |
| v | حجم سیال |
| F | نیرو |
| t | زمان |

ز

فصل ۱

مقدمه

پیشرفت اتومبیل و صنعت خودرو یکی از بزرگترین دستیافت های فناوری مدرن می باشد. اتومبیل با پاسخ دادن به نیازهای جامعه جهت راحتی و آسودگی زندگی روزمره افراد، کمک بزرگی را به رشد جامعه مدرن کرده است. صنعت خودرو در کنار چند صنعت دیگر به عنوان ستون فقرات اقتصاد جامعه مدرن جهانی نقش ایفا می کند و به تنهایی بخش عظیمی از نیروی کار فعال در جامعه را به خود اختصاص داده است. اما از طرف دیگر، استفاده از تعداد بسیار زیادی خودرو در سرتاسر جهان مشکلات جدی را برای محیط زیست و حیات انسان بوجود آورده است و در آینده نیز بوجود خواهد آورد. آلودگی هوا، گرم شدن کره زمین و کاهش ذخایر سوخت های فسیلی کره زمین از عمدۀ ترین مسائلی است که صنعت خودرو در حال حاضر برای حیات بشر ایجاد کرده است.

با افزایش قوانین سختگیرانه در مورد مصرف سوخت و آلودگی خودروها در سالهای اخیر، تکنولوژی های جدید جهت طراحی و ساخت سیستم تولید و انتقال قدرت خودروها مورد بررسی قرار گرفته است. تکنولوژی هیبرید^۱، یکی از تکنولوژی های اصلی در این دوره به حساب می آید. در این تکنولوژی، همراه با موتور احتراق داخلی^۲ از یک منبع توان دیگر که دارای قابلیت ذخیره انرژی باشد، استفاده می شود. اتوبوس های داخل شهری با توجه به ماهیت عملکردی با سرعت پایین و توقف های بسیار، گزینه مناسبی برای اجرای فناوری هیبرید می باشند. در این نوع اتوبوس ها به صورت لحظه ای مقدار زیادی توان صرف شتابگیری می شود که در طی ترمزگیری به صورت حرارت تلف می گردد. به طور کلی سیستم های قوای محرکه هیبرید بیشتر به صورت هیبریدهای الکتریکی^۳ [۲] شناخته می شوند. در هیبریدهای الکتریکی، موتور الکتریکی^۴ و مجموعه ای از باتری ها^۵، به خودروی متداول اضافه شده است. در سال های اخیر سیستم های هیبرید مکانیکی^۶ که در آنها ادوات مکانیکی به عنوان المان ذخیره انرژی به کار می روند نیز مورد توجه قرار گرفته اند.

^۱ Hybrid Technology

^۲ Internal Combustion Engine

^۳ Electric Hybrid

^۴ Electric Motor

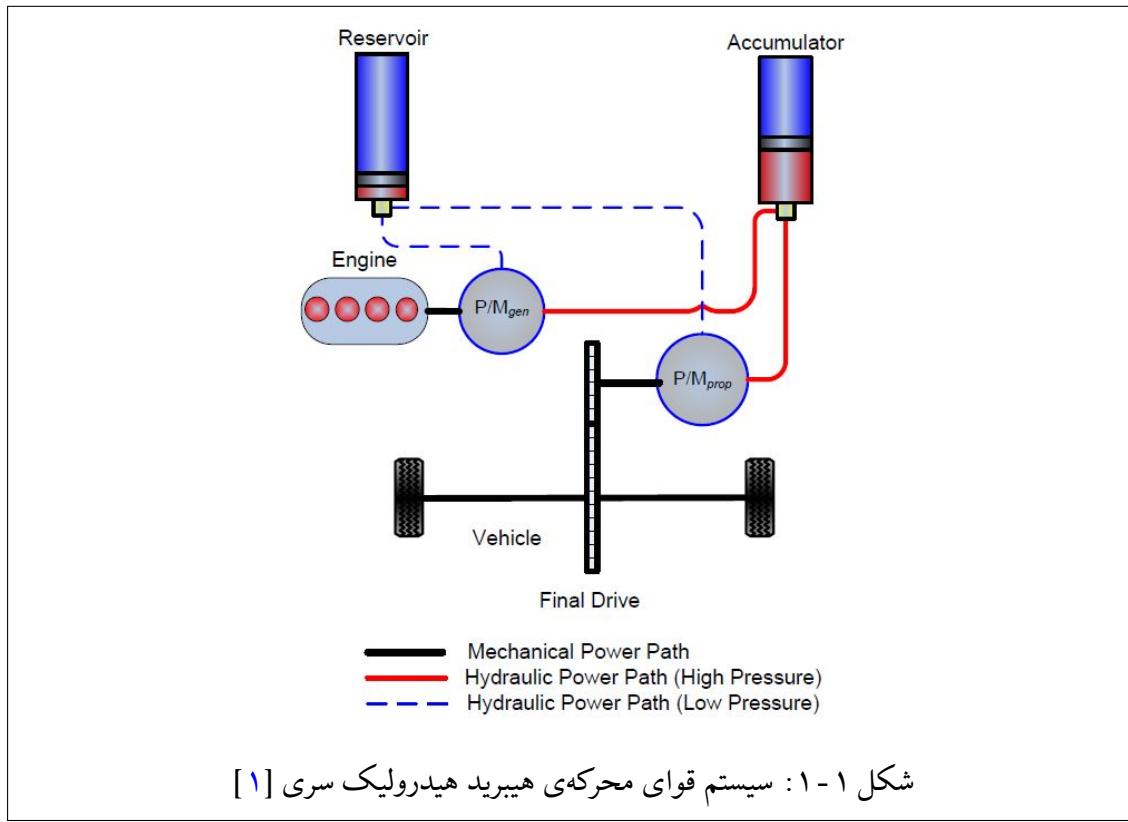
^۵ Battery Pack

^۶ Mechanical Hybrid

۱ - ۱ سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک

در میان سیستم‌های هیبرید مکانیکی، سیستم هیبرید هیدرولیک^۷ با توجه به کاربرد گسترده‌ی سیستم‌های هیدرولیکی در صنعت خودرو بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در یک سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک، مجموعه‌ای از آکومولاتور^۸‌ها به عنوان منبع ذخیره‌ی انرژی بکار می‌رود و پمپ-موتور هیدرولیکی^۹ نقش مبدل انرژی را دارد. هیبرید هیدرولیک نسبت به هیبرید الکتریکی دارای بازدهی بالاتر در انتقال توان بین مؤلفه‌های تولید و انتقال قدرت می‌باشد [۱]. علاوه بر این مؤلفه‌ی ذخیره‌ی انرژی در هیبرید هیدرولیکی (آکومولاتورها) نسبت به باتری‌های الکتروشیمیایی، چگالی توان بالاتری دارد که موجب بازیابی درصد بالاتری از انرژی ترمزی می‌شود [۱]. البته آکومولاتور در مقایسه با باتری دارای چگالی انرژی پایین‌تری است [۱]. مجموع دو نکته‌ی مذکور در مورد آکومولاتور منجر به گرایش به سمت ساختارهای هیبرید بر پایه‌ی ترمز بازیاب^{۱۰} می‌شود. همانند هیبریدهای الکتریکی ([۲]) هیبریدهای هیدرولیک در سه ساختار سری، موازی و سری-موازی قابل اجرا هستند.

در ساختار سری، موتور احتراق داخلی به عنوان شارژکننده‌ی آکومولاتورها بکار می‌رود و یک پمپ-موتور هیدرولیکی توان موردنیاز خودرو را تأمین می‌نماید (شکل ۱-۱). اما در ساختار موازی، موتور احتراق داخلی



و پمپ-موتور هیدرولیکی هردو به صورت مکانیکی به چرخ‌ها متصل هستند (شکل ۱-۲). همچنین برای اجرای هیبرید موازی تغییرات بسیار کمتری در چیدمان قطعات اتوبوس متعارف نسبت به هیبرید سری موردنیاز است. از این‌رو، اجرای ساختار موازی آسان‌تر است و با هزینه‌ی کمتری همراه می‌باشد. ساختار هیبرید سری-موازی، هردو ساختار موازی و سری را دارد و تنها میان آن دو تعویض حالت انجام می‌گیرد. این

^۷Hydraulic Hybrid

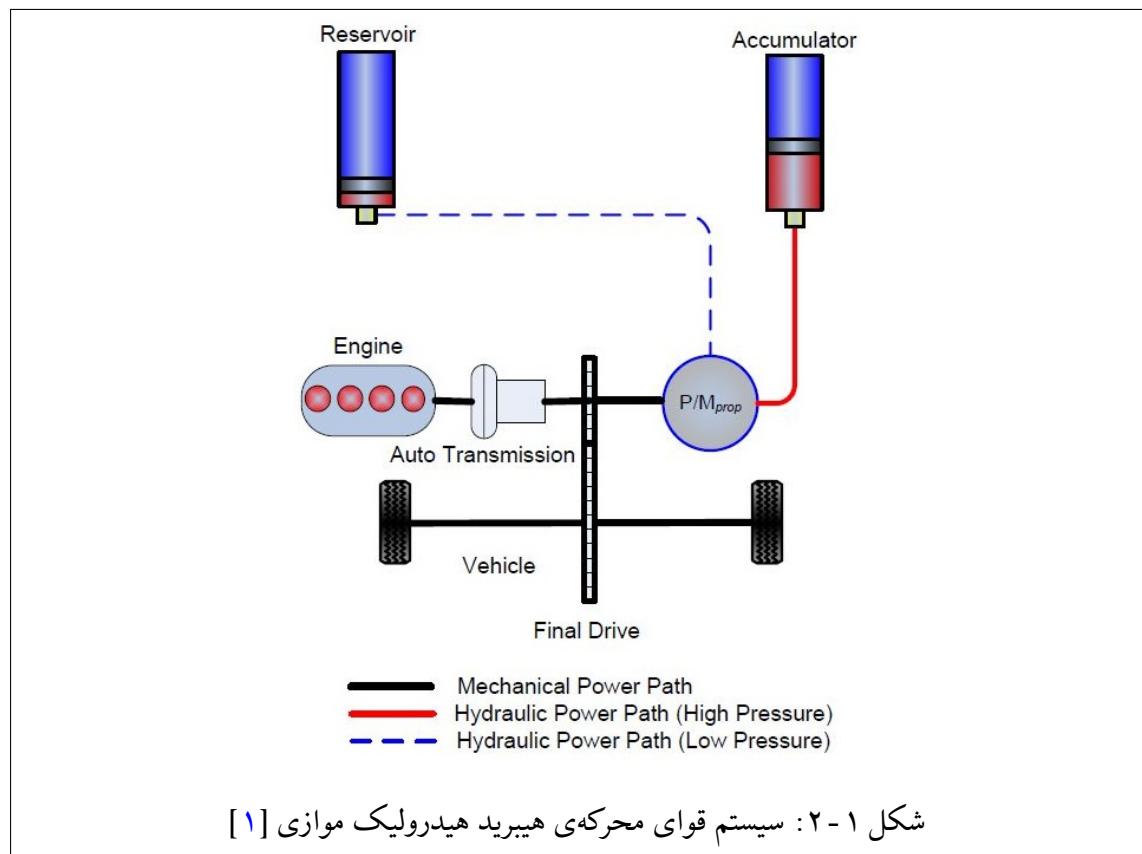
^۸Accumulator

^۹Hydraulic Pump-Motor

^{۱۰}Regenerative Braking

۱ - ۱ سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک

سیستم از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است و موردنوجه تولیدکنندگان خودرو نمی‌باشد. درمجموع، سیستم قوای محركه‌ی هیبرید هیدرولیک موازی گزینه‌ای مناسب برای کاهش مصرف سوخت اتوبوس‌های شهری محسوب می‌شود. به تناسب اهمیت این سیستم تولید و انتقال قدرت، مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل مناسب برای آن نیز امری ضروری می‌نماید. در سیستم‌های هیبرید هیدرولیک، معمولاً از پمپ-موتورهای با



شکل ۱ - ۲ : سیستم قوای محركه‌ی هیبرید هیدرولیک موازی [۱]

جابجایی متغیر^{۱۱} استفاده شده است. این ماشین‌های هیدرولیکی، با تغییر مقدار جابجایی خود توانایی اعمال گشتاورهای متفاوتی را دارا هستند. یک پمپ-موتور هیدرولیک در هر دو حالت پمپی و موتوری کار می‌کند. متداول‌ترین پمپ-موتور جابجایی متغیر از نوع پیستونی است. در این نوع پمپ-موتور، مقدار جابجایی با تغییرات زاویه‌ی صفحه‌ی مورب^{۱۲} تغییر می‌کند. مثبت بودن مقدار زاویه‌ی صفحه‌ی مورب به معنای کارکرد موتوری است. منفی بودن این زاویه، کارکرد پمپی را به همراه دارد. این موضوع در شکل‌های ۳-۱ و ۴-۱ نشان داده شده است.

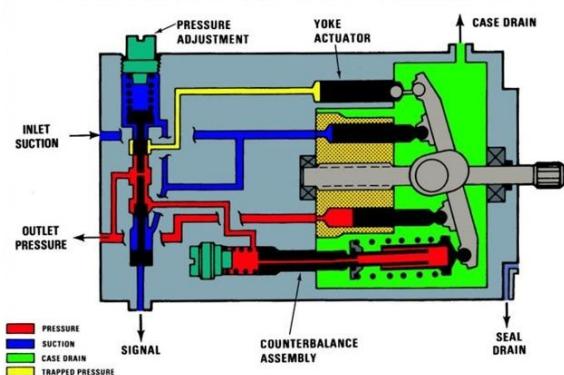
بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی^{۱۳} خودروهای هیبرید مربوط به هیبریدهای الکتریکی بوده است. هرچند که تحقیقات محدودی نیز در مورد هیبریدهای هیدرولیک با هدف شبیه‌سازی عملکرد سیستم و طراحی کنترل مناسب انجام شده است. در یکی از نخستین فعالیت‌های انجام‌شده، الدر و اتیس^[۲]، یک مدل کامپیوتری برای سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک سری ارائه کردند. این مدل قابل استفاده برای انواع خودروهای سواری، ون و اتوبوس بود. همچنین در این مدل، برای

^{۱۱} Variable Displacement

^{۱۲} Swash Plate Angle

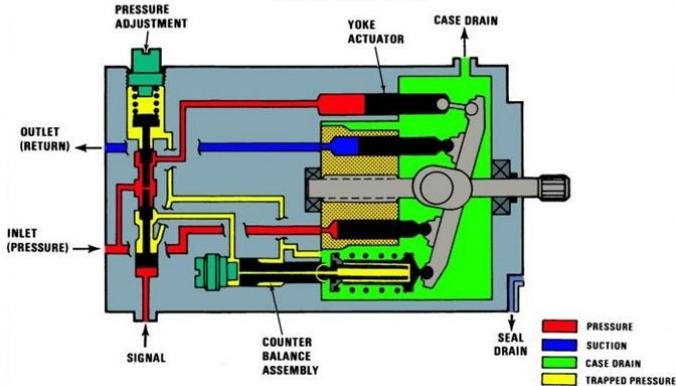
^{۱۳} Modeling

APU MOTOR PUMP SCHEMATIC—PUMPING MODE



شکل ۱ - ۳: پمپ-موتور پیستونی هیدرولیک - کارکرد پمپی

APU MOTOR PUMP SCHEMATIC MOTORING MODE



شکل ۱ - ۴: پمپ-موتور پیستونی هیدرولیک - کارکرد موتوری

مدل‌سازی افتهای حجمی و گشتاوری در پمپ-موتور هیدرولیکی از مدل ارائه شده توسط ویلسون [۴]، استفاده شده است. مدل ویلسون، یک ابزار کامل جهت مدل‌سازی افتهای موجود در پمپ‌ها و موتورهای هیدرولیکی است که به عنوان مدل پایه برای کارهای بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. البته استفاده از مدل ویلسون مستلزم در اختیار داشتن اطلاعات دقیق پمپ-موتور است. این اطلاعات دقیق با استفاده از انعام آزمایشات مخصوص روى پمپ-موتور بدست می‌آيد. همچنین در سال ۱۹۷۹ بوجوالد [۵]، مطالعه‌ای روی دو اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی انجام داد. به منظور ارزیابی صحت مدل ساخته شده، بوجوالد سیستم موردنظر را روی یک خودروی ون اجرا نمود. نتیجه کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی مصرف سوخت خودرو را نشان می‌داد. این مدل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فورترن^{۱۴} ایجاد شده است. در سال ۱۹۸۵ تحقیقی در مورد مدل‌سازی یک خودروی سواری هیبرید هیدرولیک موازی، توسط تولفسون، بیچلی و فرانکزاک [۶]، انجام شد. این تحقیق، کاهش قابل توجه مصرف سوخت را در مسیرهای شهری برای خودروی سواری هیبرید هیدرولیک موازی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۸۹ نیز ردی و رایودو [۷]،

^{۱۴}Fortran

مطالعه‌ای روی یک اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با پمپ-موتور جابجایی ثابت انجام دادند. هدف از آن مطالعه، بررسی مزیت پمپ-موتورهای جابجایی متغیر بر نوع جابجایی ثابت در سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبریدی بود. استکی و ماتیسون [۸] در سال ۲۰۰۳، یک پروژه‌ی مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم هیبرید هیدرولیک و طراحی استراتژی کنترل مناسب را برای یک خودروی نظامی انجام دادند. این پروژه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده‌است. همچنین، دور علی [۹] در سال ۲۰۰۴ در ایران یک سیستم قوای محرکه هیدرواستاتیک را برای یک اتوبوس مدل‌سازی و طراحی نمود. در سیستم قوای محرکه هیدرواستاتیک، بازیابی انرژی و شارژ منبع ذخیره انرژی وجود ندارد. این مدل‌سازی با استفاده از روابط تحلیلی مربوط به عملکرد پمپ و آکومولاتور هیدرولیکی انجام گرفته‌است. در سال ۲۰۰۸ کیم [۱۰]، یک مدل‌سازی کامل روی انواع ساختارهای هیبرید هیدرولیک به همراه طراحی استراتژی کنترل‌های بهینه انجام داد. تحقیقات کیم روی خودروی نظامی هامر و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده‌است. مینگویشان در سال ۲۰۰۹ [۱۱]، مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل را برای یک کامیون هیبرید هیدرولیک سری ارائه نموده‌است. طرحی مشابه در سال ۲۰۱۰ توسط مولا [۱۲] روی یک خودروی سواری هیبرید هیدرولیک سری صورت گرفته‌است. همچنین در همین سال، یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید موازی هیدرولیکی برای یک اتوبوس شهری مدل‌سازی شده‌است [۱۲]. این مدل‌سازی بدون درنظر گرفتن بازده‌های قطعات اصلی سیستم انجام گرفته‌است. بحث اصلی در فرآیند مدل‌سازی یک اتوبوس هیبرید، اعمال بازده‌های قطعات است. مدل‌سازی یک اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با لحاظ نمودن بازده‌های پمپ-موتور هیدرولیکی و آکومولاتورها، موردی است که تاکنون انجام نشده‌است. بعلاوه ایجاد مدل مذکور، راه را برای فعالیت‌های آتی روی سیستم‌های قوای محرکه هیبرید هیدرولیک و همچنین طراحی استراتژی‌های کنترل مناسب باز می‌نماید.

یک مسئله‌ی مهم در طراحی خودروهای هیبرید، کنترل مناسب جریان توان میان مؤلفه‌های تولید قدرت است. پاسخ به این مسئله توسط یک استراتژی کنترل^{۱۵} مناسب انجام می‌گیرد. استراتژی کنترل، یک الگوریتم تصمیم‌گیری است. این الگوریتم شامل قانون‌هایی به منظور قانون‌مند نمودن فعالیت ادوات سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید می‌باشد. ورودی‌های استراتژی کنترل، مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی متغیرهایی از قبیل سرعت خودرو، شتاب خودرو، گشتاور مطلوب راننده و سطح شارژ منبع ذخیره‌ی انرژی است. پس از اعمال الگوریتم استراتژی کنترل، مقادیر گشتاور یا توان موردنیاز مؤلفه‌های تولید قدرت به عنوان خروجی‌های الگوریتم به آنها ارسال می‌شود. تعیین مناسب این مقادیر، موجب عملکرد بهینه‌ی ادوات سیستم تولید قدرت و درنهایت کاهش مصرف سوخت خوردو می‌شود.

در کنار تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی، فعالیت‌هایی نیز به منظور طراحی استراتژی کنترل مناسب برای این سیستم‌ها صورت گرفته‌است. البته دو فرآیند مدل‌سازی و طراحی کنترل استراتژی در اکثر تحقیقات به صورت مکمل یکدیگر ارائه شده‌اند. در سال ۱۹۸۵، وو [۱۳]، یک پروژه‌ی مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل بهینه را برای یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک انجام داد. این تحقیقات روی یک خودروی سواری انجام شد. همچنین در آن سالها، کاپلن [۱۴]، استراتژی کنترل موتور احتراق داخلی به صورت روش - خاموش را برای ساختارهای

^{۱۵}Control Strategy

۱-۲ استراتژی کنترل هوشمند

مختلف هیبرید هیدرولیک استفاده کرده است. در سال ۱۹۸۴ نیز یک پروژه مدل سازی و طراحی استراتژی کنترل مناسب برای یک اتوبوس شهری هیبرید هیدرولیک در آلمان توسط مارتینی [۱۵]، ارائه شده است. در سال ۱۹۸۷، ناکازاوا [۱۶]، یک استراتژی کنترل مناسب را برای سیستم هیبرید هیدرولیک اجرا شده روی اتوبوس‌های شهری ژاپن طراحی کرد. در اتوبوس‌های موردنظر، سیستم هیبرید با هدف بازیابی انرژی ترمیزی به کار رفته است. در سال ۱۹۸۹ پروژه مشابه توسط دیویس [۱۷] در کانادا و روی یک اتوبوس شهری در صورت گرفته است. هوگسون [۱۸] در سال ۱۹۹۳ استراتژی کنترل طراحی شده برای یک اتوبوس شهری در کشور آلمان را که از فناوری هیبرید هیدرولیک در آن استفاده شده بود، ارائه نمود. ساختار هیبرید استفاده شده در این اتوبوس، سری بوده است. در سال ۲۰۰۰، دانشگاهی در لهستان یک نمونه اتوبوس هیبرید هیدرولیک را با ساختار موازی طراحی و اجرا نمود. مدل سازی و طراحی کنترل استراتژی این اتوبوس توسط پاولسکی [۱۹]، ارائه شده است. همچنین در سال ۲۰۰۲ شرکت فورد موتورز^{۱۶} آمریکا یک سیستم هیبرید هیدرولیک موازی را برای خودروهای SUV طراحی و اجرا نمود. مدل سازی و طراحی استراتژی کنترل مناسب برای این سیستم توسط کپنر [۲۰] ارائه شده است. در سال ۲۰۰۸ شرکت بوش رکسروت^{۱۷}، پروژه مشابه را روی کامیون‌های حمل زباله اجرا کرد. امروزه این کامیون‌های هیبرید هیدرولیک در شهرهای آلمان، فرانسه و ایالات متحده امریکا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال ۲۰۰۹، هوی و همکاران با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی و همچنین موتور استنتاج فازی^{۱۸} یک استراتژی کنترل بهینه را برای سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک سری-موازی طراحی و ارائه کرده است [۲۱].

۱-۲ استراتژی کنترل هوشمند

استراتژی‌های کنترلی موجود برای خودروهای هیبرید به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۲۲]: قانون‌مند^{۱۹} و براساس بهینه‌سازی^{۲۰}. در دسته‌ی اول، قوانین استراتژی کنترل براساس اطلاعات شهودی و تجربه‌ی فرد متخصص تنظیم می‌شوند. استراتژی‌های کنترل قانون‌مند ساده هستند و به صورت زمان‌واقعی^{۲۱} قابل استفاده می‌باشند. همچنین این کنترلرها به دو صورت فازی^{۲۲} و غیرفازی قابل اجرا هستند [۲۲]. در دسته‌ی دوم، یکتابع هزینه که بیانگر مقدار مصرف سوخت خودرو است، تعریف می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف، مقادیر بهینه برای متغیرهای خروجی استراتژی کنترل تعیین می‌گردد. روش بهینه‌سازی دینامیکی^{۲۳} و الگوریتم ژنتیک^{۲۴} به عنوان روش‌های پرکاربرد برای یافتن تخصیم بهینه کلی در استراتژی‌های کنترل هیبرید کاربرد دارند. با توجه به ماهیت دینامیک استراتژی کنترل در خودرو، روش برنامه‌ریزی دینامیکی گزینه‌ی منطقی تری به نظر می‌رسد. برای اجرای روش برنامه‌ریزی دینامیکی نیاز به اطلاعات آتی سیکل حرکتی وجود دارد؛ از این‌رو بهینه‌سازی دینامیکی در عمل قابل استفاده نمی‌باشد. بعضی از استراتژی‌های کنترل بهینه به صورت زمان‌واقعی نیز اجرا می‌شوند [۲۲]. در کنار تقسیم‌بندی فوق برای استراتژی کنترل خودروهای

^{۱۶}Ford Motors

^{۲۱}Real-Time

^{۱۷}Bosch-Rexroth

^{۲۲}Fuzzy

^{۱۸}Fuzzy Inference Engine

^{۲۳}Dynamic Programming

^{۱۹}Rule-Based

^{۲۴}Genetic Algorithm

^{۲۰}Optimization-Based

هیبرید، استراتژی کنترل هوشمند^{۲۵}، به صورت الگوریتمی تعریف می‌شود که براساس اطلاعات استخراج شده از سیکل حرکتی، قوانین خود را تعیین می‌کند [۲۶]. به عبارت دیگر، در یک استراتژی کنترل هوشمند اطلاعات سیکل حرکتی نیز به عنوان ورودی‌های کنترل استفاده می‌شوند. تحقیقات گذشته نشان داده است که تغییر در نوع مسیر حرکت (شهری، اتوبان و ...) و حالت ترافیکی آن (شلوغ، خلوت یا متعادل)، تأثیر بسیاری در میزان کاهش مصرف سوخت خودرو دارد ([۲۷]). در یک کنترل هوشمند، روش‌های مختلف شناسایی سیستم^{۲۶} و شناسایی الگو^{۲۷} به منظور شناسایی نوع مسیر حرکت و حالت ترافیکی موجود در آن به کار می‌رود. کنترل موجود در یک استراتژی کنترل هوشمند، می‌تواند از هریک از دو دسته فوق (قانونمند و براساس بهینه‌سازی) باشد. با اعمال این نوع استراتژی کنترل، می‌توان کنترل را برای سیکل‌های حرکتی مختلف با انواع حالات ترافیکی استفاده کرد، بدون آنکه نقصی در کیفیت عملکرد سیستم هیبرید ایجاد شود.

در طراحی یک استراتژی کنترل، بایستی قیود موجود روی عملکرد خودرو در نظر گرفته شود. منظور قیودی مانند پایداری سطح شارژ مخازن انرژی و همچنین قابلیت رانندگی^{۲۸} است. قابلیت رانندگی، پارامتری است که بیانگر سطح رضایت راننده از رانندگی با خودرو می‌باشد. اگر تعداد خاموش/ روشن‌های موتور احتراق داخلی در طول حرکت خودرو زیاد باشد، قابلیت رانندگی خودرو پایین است ([۲۹]).

اولین اقدام به منظور طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای خودروهای هیبرید توسط یانگ‌سئوب‌وون و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۲۴]، انجام شده است. در آن تحقیق یک شبکه‌ی عصبی به عنوان واحد استخراج و شناسایی اطلاعات سیکل حرکتی استفاده شده است. واحد شناسایی در این طرح، یک واحد جامع است که علاوه بر سیکل حرکتی، مشخصات راننده و نحوه رانندگی آن را نیز شناسایی می‌کند. همچنین کنترل استفاده شده، یک کنترل فازی قانونمند می‌باشد که قوانین آن مناسب با نوع سیکل حرکتی پیش‌بینی شده، انتخاب می‌گردد. در سال ۲۰۰۸ فعالیت مشابهی توسط مورفی و همکاران [۲۶] انجام شده است. با این تفاوت که پارامترهای موردنیاز برای شناسایی سیکل حرکتی کاهش یافته است. همچنین قوانین کنترل فازی با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی بهینه شده‌اند. این طرح، بهبود ۵/۲ درصدی در مصرف اقتصادی سوخت^{۲۹} خودرو را گزارش کرده است. هر دو استراتژی کنترل ذکر شده در بالا روی خودروهای سواری هیبرید الکتریکی موازی شبیه‌سازی شده‌اند. در سال ۲۰۰۷ عبداللهی و همکاران [۲۷] در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تحقیقی مشابه با طرح یانگ‌سئوب‌وون انجام داده است. در طرح اخیر نیز کنترل استفاده شده، فازی می‌باشد. تفاوت دو طرح مذکور در نحوه استخراج اطلاعات سیکل حرکتی و تعداد پارامترهای مناسب برای شناسایی سیکل است. همچنین در طرح عبداللهی برای هریک از سیکل‌های استاندارد موجود، قوانین فازی با استفاده از یک روش بهینه‌سازی استخراج شده است. این طرح، بهبود ۷/۵ درصدی در مصرف سوخت خودرو را گزارش کرده است. در سال ۲۰۰۹ تیان ایی [۲۸] یک استراتژی کنترل برای خودروی سواری هیبرید الکتریکی موازی ارائه نمود که در آن یک شبکه‌ی نرو- فازی به عنوان واحد شناسایی سیکل حرکتی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۰ ژی‌هوانگ و همکاران [۲۹] یک استراتژی کنترل هوشمند را برای خودروی سواری هیبرید الکتریکی موازی ارائه نمودند. در این طرح با استفاده از یک دسته‌بندی کننده^{۳۰}،

^{۲۵} Intelligent

^{۲۶} System Identification

^{۲۷} Pattern Recognition

^{۲۸} Driveability

^{۲۹} Fuel Economy

^{۳۰} Classifier

۱ - ۳ هدف از انجام پروژه‌ی حاضر

ابتدا هر قسمت از سیکل در یکی از دسته‌های از پیش تعیین شده برای مسیر قرار گرفته است. سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی که برای هر دسته به طور جداگانه طراحی شده است، سرعت خودرو در یک گام زمانی آتی پیش‌بینی شده است. کنترل طراحی شده در این طرح، از نوع قانون‌مند می‌باشد. این طرح بهبود ۵ درصدی را در اقتصاد سوخت خودرو گزارش کرده است.

۱ - ۳ هدف از انجام پروژه‌ی حاضر

باتوجه به موارد بیان شده در بالا، مشخص است که توجه اصلی بین سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی، با توجه به چگالی انرژی کم آنها، معطوف به ساختار موازی و با هدف بازیابی انرژی ترمزی است. کارهای انجام شده در زمینه‌ی طراحی و مدل‌سازی سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک موازی، بدون اعمال بازدهی ادوات بوده است. در پروژه‌ی حاضر یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک موازی طراحی و مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی به صورت روبه‌جلو است و به کمک نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام گرفته است. برای اعمال بازدهی ادوات مختلف سیستم، اطلاعات موجود در کاتالوگ آنها به کمک جداول جستجو^{۳۱} مدل شده است. با انجام مدل‌سازی به صورت روبه‌جلو، مدل ارائه شده در مقایسه با مدل‌های روبه‌عقب (بطورمثال نرم‌افزار ADVISOR) تطابق بیشتری با اتوبوس واقعی دارد. شایان ذکر است که این مدل‌سازی در ایران سابقه‌ی قابل توجهی ندارد.

با مرور انواع استراتژی کنترل‌های موجود برای سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبرید، بدیهی است که یک استراتژی کنترل هوشمند مناسب‌ترین گزینه می‌باشد. همان‌طورکه بیان شد با استفاده از یک استراتژی کنترل هوشمند مناسب می‌توان مقدار مصرف سوخت خودرو را در انواع جاده‌ها و شرایط ترافیکی کاهش داد. در تمامی الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده، با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی، بازه‌ای معین از سیکل رانندگی موردنظر تحلیل و به یک گروه از شرایط ترافیکی مشخص نسبت داده می‌شود. به عبارت دیگر، بازه‌ای از یک سیکل رانندگی تنها امکان عضویت در یک دسته شرایط ترافیکی خاص را دارد. این ایراد به طرز تفکر اخیر وارد است که یک سیکل رانندگی نمی‌تواند از لحاظ شرایط ترافیکی دقیقاً شیوه یک سیکل مرجع باشد. همچنین، سیکل‌های رانندگی مرجع درنظر گرفته شده نیز قابلیت پوشش کامل انواع شرایط ترافیکی در جاده‌ها را ندارند. در سال ۲۰۱۱ فتوحی [۳۰] با درنظر گرفتن این ایراد، یک راهکار جدید به منظور طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای یک خودروی سواری هیبرید الکتریکی موازی ارائه داده است. او به جای درنظر گرفتن سیکل‌های رانندگی مرجع، استراتژی کنترل بهینه را برای سیکل‌های رانندگی نمونه، براساس مقادیر چندین مشخصه‌ی رانندگی بدست آورده است. سپس به منظور شناسایی سیکل موردنظر، مقدار چند پارامتر مشخص به صورت آنلاین تعیین شده است. براساس این مقادیر، ضرائب بهینه در استراتژی کنترل تعیین و اعمال شده‌اند.

در این پایان‌نامه، ایراد مذکور به روشنی دیگر پاسخ داده شده است. ایده‌ی اصلی آن است که هر سیکل رانندگی با یک درجه‌ی عضویت مشخص شیوه به هریک از سیکل‌های رانندگی مرجع می‌باشد. براین اساس، به هر بازه از سیکل رانندگی، اعدادی بین صفر و یک نسبت داده می‌شود که آن بازه متناسب با این اعداد به هریک

^{۳۱}Look-up Table

۱-۳ هدف از انجام پروژه‌ی حاضر

از سیکل‌های مرجع شباهت دارد. سپس استراتژی‌های کنترلی بهینه که برای هر سیکل مرجع بدست آمده‌اند، متناظر با آن درجات شباهت در استراتژی نهایی سیکل موردنظر تأثیر داده می‌شوند. با استفاده از این ایده، ایراد عدم پوشش تمامی شرایط ترافیکی توسط سیکل‌های مرجع از اهمیت بالایی برخوردار نخواهد بود. زیرا فضای شرایط ترافیکی جاده، فازی دیده شده است.

به منظور پیاده‌سازی استراتژی کنترل هوشمند براساس ایده‌ی فوق، به ترتیب ۳ مرحله انجام شده است:

- طراحی استراتژی کنترل بهینه برای سیکل‌های رانندگی مرجع. در این مرحله، با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی، استراتژی کنترل بهینه متناظر با ۴ سیکل رانندگی مرجع بدست آمده است.
- مدل‌سازی استراتژی‌های کنترلی بهینه. استراتژی‌های کنترلی بهینه‌ی بدست آمده در مرحله‌ی قبل، آفلاین^{۳۲} هستند و برای استفاده از آنها نیازمند دسترسی به اطلاعات سیکل رانندگی پیش از حرکت خودرو هستیم. در این مرحله، با استفاده از مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی، یک مدل برای استراتژی کنترل بهینه متناظر با هر سیکل رانندگی مرجع ارائه شده است.
- شناسایی سیکل رانندگی و اختصاص درجات شباهت. در این مرحله با استفاده از یک الگوریتم انتخاب مشخصه^{۳۳} و یک الگوریتم خوشبندی فازی^{۳۴}، واحد شناسایی سیکل رانندگی طراحی شده است. خروجی این بخش، مقادیر درجات شباهت سیکل رانندگی به سیکل‌های مرجع می‌باشد. با انجام ۳ مرحله‌ی فوق، ابزار لازم جهت اجرای استراتژی کنترل هوشمند در دسترس هستند. به منظور اجرای این استراتژی، مجموعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی به همراه مقادیر مشخصات انتخاب شده (خروجی الگوریتم انتخاب مشخصه) متناظر با ۴ سیکل رانندگی مرجع، در یک کتابخانه^{۳۵} ذخیره می‌شوند. در هنگام شبیه‌سازی اتوبوس به صورت آنلاین^{۳۶} در سیکل رانندگی دلخواه، در ۱۰ ثانیه‌ی اول از سیکل، ضرائب شباهت مساوی و برابر ۰/۲۵ برای هریک از چهار سیکل رانندگی استاندارد در نظر گرفته شده است. پس از آن، واحد شناسایی سیکل شروع بکار می‌کند. به این ترتیب که ابتدا مشخصات مورد نظر از سیکل رانندگی استخراج می‌شوند. در این قسمت تنها مقدار سرعت سیکل در زمان‌های گذشته‌ی سیکل به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. پس از آن مقادیر مشخصات سیکل وارد بلوک خوشبندی فازی می‌شود. در این مرحله، با در اختیار داشتن مقادیر مشخصات مربوط به سیکل‌های مرجع، ضرائب شباهت سیکل حاضر به سیکل‌های مرجع تعیین می‌گردد. این ضرائب خروجی نهایی واحد شناسایی سیکل می‌باشد. در هر ثانیه از سیکل رانندگی، با در نظر داشتن مقادیر سرعت سیکل رانندگی از ابتدای سیکل تا لحظه‌ی حاضر، مقادیر ضرائب شباهت به روز می‌شوند. این روند تا انتهای سیکل رانندگی ادامه می‌یابد. خروجی نهایی کنترلر هوشمند با ترکیب خطی مقادیر کنترل‌های بهینه که با ضرائب شباهت وزن دهنده شده‌اند بدست می‌آید. نحوه‌ی اجرای استراتژی کنترل هوشمند در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.

رونده‌ای ارائه‌ی مطالب در این پایان‌نامه، به این صورت است که ابتدا طراحی سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک موازی برای یک اتوبوس شهری ارائه شده است. در فصل بعد، نحوه‌ی مدل‌سازی ادوات مختلف در سیستم تولید و انتقال قدرت توضیح و در نهایت، مدل کامل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی

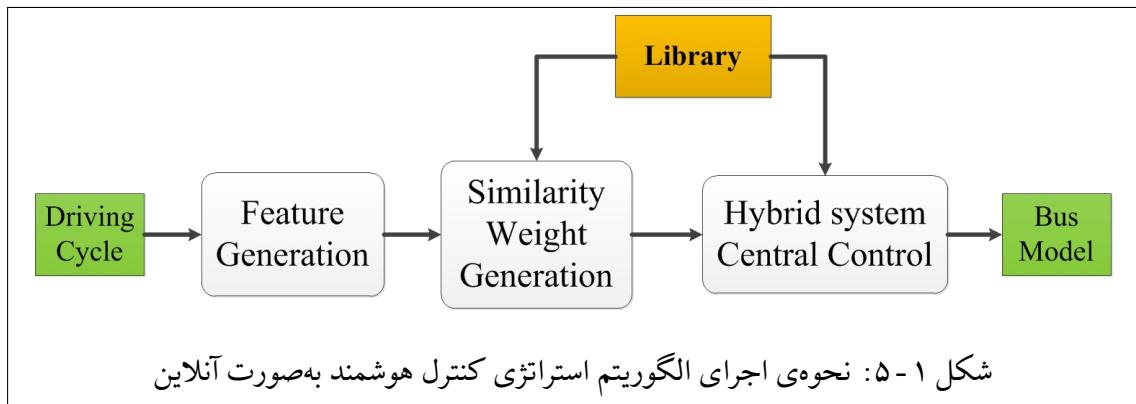
^{۳۲}Off-line

^{۳۳}Feature Selection

^{۳۴}Fuzzy Clustering

^{۳۵}Library

^{۳۶}On-line



معرفی شده است. همچنین، یک استراتژی کنترل قانونمند برای سیستم هیبرید در این فصل طراحی و ارائه شده است. در فصل چهارم، روند طراحی استراتژی کنترل هوشمند، براساس ایده‌ی ارائه شده در بالا، آمده است. در این فصل، ۳ قسمت اصلی استراتژی کنترل معرفی و کیفیت عملکرد هر قسمت بررسی شده است. در پایان، نتایج شبیه‌سازی اتوبوس متعارف و اتوبوس هیبرید هیدرولیک با استراتژی‌های کنترلی قانونمند و هوشمند ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها مربوط به ۷ سیکل رانندگی مختلف می‌باشند.

فصل ۲

طراحی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی

در این فصل روند طراحی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی ارائه شده است. ابتدا نحوه سایزینگ^۱ اجزای تولید قدرت با توجه به عملکرد موردنیاز اتوبوس آمده است. در پایان بخش، چیدمان نهایی اجزای سیستم تولید و انتقال قدرت ارائه شده است.

خودروی هیبرید هیدرولیک دارای سه جزء اصلی می باشد که مشخصات هر یک باید براساس حدود عملکردی تعیین شده و مشخصات هندسی خودروی پایه تعیین گردد. این سه جزء موتور احتراق داخلی، پمپ-مотор هیدرولیک و آکومولاتورهای هیدرولیکی هستند. به یک خودرو مجموعه‌ای از بارهای مختلف وارد می شود که بسته به الگوی عملکردی خودرو در شرایط مختلف برخی از آنها قابل صرف نظر کردن است. یکی از بارهای مهم و تأثیرگذار بر توان موردنیاز خودرو مؤلفه شتاب در معادله حرکت خودرو می باشد. با توجه به ماهیت کوتاه مدت بودن این مؤلفه، می توان عملکرد خودرو را به دو دسته حالت پایا و حالت گذرا تقسیم نمود. در عملکرد حالت پایا با توجه به محدود بودن انرژی ذخیره شده در مجموعه تولید توان ثانویه، عملاً غلبه بر تمامی بار وارد بر خودرو بر عهده مجموعه تولید خودرو را به همان موتور احتراق داخلی می باشد. در حالت گذرا بسته به ساختار خودرو و درصد هیبریدسازی موردنظر طراح، هر یک از دو مجموعه تولید توان، سهم مشخصی از میزان توان موردنیاز برای حرکت خودرو خواهند داشت. با توجه به انتخاب توان موتور احتراق داخلی در حالت پایا در قدم بعدی با توجه به نتایج مربوط به حالت گذرا می توان به طراحی مجموعه توان ثانویه (پمپ-مotor هیدرولیک) پرداخت. تعیین ابعاد آکومولاتورهای موردنیاز جهت ذخیره انرژی در سیستم، تابع روند مصرف و بازیابی انرژی در طول سیکل رانندگی است. این مهم تا زمان انجام مدل سازی سیستم قوای محرکه به تعویق می افتد. در هر حال جهت انجام مدل سازی و آغاز شبیه سازی ها یک انتخاب اولیه در مورد تعداد و حجم آکومولاتورها صورت گرفته است.

^۱Sizing

۱-۲ مشخصات کلی خودروی موردنظر و حدود عملکردی

خودروی انتخاب شده، اتوبوس داخل شهری ۰۴۵۷ مخصوص شرکت ایران خودرو دیزل می‌باشد. برای انجام فرایند طراحی اولیه از مشخصات این اتوبوس استفاده می‌گردد. در جدول ۱-۲ مشخصات خودروی موردنظر ارائه گردیده است. قابل ذکر است که وزن اتوبوس بر اساس ۳۵ نفر نشسته و ۳۵ نفر ایستاده محاسبه

جدول ۱-۲ : مشخصات اتوبوس ۰۴۵۷

| مشخصه | مقدار |
|---------------------------------|-------------------------|
| وزن اتوبوس بدون سرنشین | ۹۸۲۰ kg |
| وزن اتوبوس با سرنشین | ۱۴۷۲۰ kg |
| شعاع چرخ | ۰/۴۶۶ m |
| سطح دید اتوبوس | ۲/۰ m ² |
| ضریب اصطکاک غلتشی | ۰/۰۱ |
| ضریب درگ | ۰/۵۵ |
| بازده سیستم تولید و انتقال قدرت | ۰/۸۵ |
| ضریب دندنه دیفرانسیل | ۴/۲ |
| چگالی هوا | ۱/۲۰۲ kg/m ³ |
| ضریب اعمال جرم مؤثر | ۱/۰۵ |

شده است. محاسبات پیش رو نیز بر پایه وزن اتوبوس پر از مسافر انجام خواهد شد. علاوه بر مشخصات خودرو، عامل مؤثر بعدی در فرایند سایزینگ، حدود عملکردی درنظر گرفته شده برای خودرو می‌باشد. این حدود با توجه به مرور عملکرد سایر اتوبوس‌های شهری بدست آمده است. قیود عملکردی اتوبوس شهری مربوط به شبیه‌سازی در جدول ۲-۲ ارائه گردیده است. همچنین قیود عملکردی مربوط به شتاب‌گیری اتوبوس نیز در جدول ۲-۳ ارائه گردیده است.

علاوه بر موارد فوق، قوای محرکه خودرو باید به گونه‌ای طراحی شود که اتوبوس قابلیت حرکت با حداکثر سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت را دارا باشد.

۲-۲ توان موردنیاز خودرو در شرایط مختلف عملکردی

با نهایی شدن مشخصات خودرو و حدود عملکردی مورد انتظار می‌توان به بررسی توان مصرفی خودرو در شرایط مختلف حرکتی پرداخت. برای این منظور با استفاده از معادلات حاکم بر دینامیک خودرو در شرایط

۲-۲ توان موردنیاز خودرو در شرایط مختلف عملکردی

جدول ۲-۲: قیود شیب‌پیمایی اتوبوس شهری

| سرعت ثابت (km/h) | قید موردنظر | شرایط کارکرد |
|------------------|-------------|--|
| ۴۰ | شیب ۷ درصد | ماکزیمم شیب مجاز برای کارکرد اتوبوس به صورت پیوسته |
| ۳۵ | شیب ۱۰ درصد | ماکزیمم شیب مجاز برای کارکرد اتوبوس تا ۵ دقیقه |
| ۲۰ | شیب ۱۴ درصد | ماکزیمم شیب مجاز برای کارکرد اتوبوس به صورت لحظه‌ای (در زمان کمتر از یک دقیقه) |

جدول ۲-۳: قیود شتاب‌گیری اتوبوس شهری

| میزان تغییر سرعت (km/h) | زمان مطلوب (sec) |
|-------------------------|------------------|
| ۲۵ | از ۰ تا ۱۰ |
| ۳۵ | از ۲۵ تا ۵ |
| ۴۰ | از ۳۵ تا ۵ |
| ۴۴ | از ۴۰ تا ۵ |
| ۶۵ | از ۰ تا ۶۰ |

مختلف عملکردی میزان توان مورد نیاز تخمین زده شده است. معادلات دینامیک خودرو برای حرکت در شتاب‌گیری به صورت [۲]

$$P_{acceleration} = \frac{1}{T} \int_0^T (Mg f_r V + \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f V^2 + \delta M V \cdot \frac{dv}{dt}) dt \quad (1-2)$$

است و در شرایط شیب‌پیمایی معادله‌ی [۲]

$$P_{gradeability} = \frac{V}{\eta_t} (Mg f_r + \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f V^2 + Mg i) \quad (2-2)$$

حاکم است. در این راستا میزان توان مورد نیاز خودرو برای شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی مطابق قیود حرکتی ارائه شده در بالا، به ترتیب در جداول ۴-۲ و ۵-۲ آمده است. مقادیر بدست آمده با درنظر گرفتن بازدهی سیستم انتقال قدرت می‌باشند.

جدول ۲-۴: مقادیر توان موردنیاز برای اراضی قیود شتاب‌گیری اتوبوس

| توان موردنیاز (kW) | شرایط کارکرد |
|--------------------|--------------------------------------|
| ۸۵ | از ۰ تا ۲۵ کیلومتربرساعت در ۱۰ ثانیه |
| ۸۹ | از ۲۵ تا ۳۵ کیلومتربرساعت در ۵ ثانیه |
| ۷۰ | از ۳۵ تا ۴۰ کیلومتربرساعت در ۵ ثانیه |
| ۶۰ | از ۴۰ تا ۴۴ کیلومتربرساعت در ۵ ثانیه |
| ۱۳۱ | از ۰ تا ۶۵ کیلومتربرساعت در ۶۰ ثانیه |

جدول ۲-۵: مقادیر توان موردنیاز برای اراضی قیود شیب‌پیمایی اتوبوس

| توان موردنیاز (kW) | شرایط کارکرد |
|--------------------|--|
| ۶۳ | حرکت با سرعت ۸۰ کیلومتربرساعت در شیب صفر |
| ۱۵۱ | حرکت با سرعت ۴۰ کیلومتربرساعت در شیب ۷ درصد |
| ۱۷۹ | حرکت با سرعت ۳۵ کیلومتربرساعت در شیب ۱۰ درصد |
| ۱۳۸ | حرکت با سرعت ۲۰ کیلومتربرساعت در شیب ۱۴ درصد |

۳-۲ سایزینگ المان‌های موجود در ساختار قوای محرکه‌ی هیبرید

هیدرولیک موازی

در این قسمت، با توجه به مقادیر توان موردنیاز برای هریک از شرایط حرکتی اتوبوس، مقدار بیشینه‌ی توان هریک از دو المان تولید قدرت تعیین شده است. همان‌طورکه اشاره شد، در سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید حاضر، موتور احتراق داخلی به عنوان المان اصلی تولید قدرت در نظر گرفته شده است. از این‌رو با این‌رویتی توان موردنیاز اتوبوس برای حرکت در شرایط پیوسته را تأمین نماید [۲]. شرایط حرکتی پیوسته برای اتوبوس، شامل حرکت در شیب صفر و همچنین حرکت در شیب ۷ درصد می‌باشد. مقدار بیشینه‌ی توان موردنیاز در این دو حالت برابر با ۱۵۱ کیلووات است (جدول ۲-۵). موتور احتراق داخلی با این‌رویتی این توان را تأمین نماید. از میان گزینه‌های موجود برای انتخاب موتور احتراق داخلی (که شامل محصولات شرکت ایدم تبریز می‌شود) موتور OM906LA قادر به تولید این مقدار توان می‌باشد. این موتور در انواع مختلف با توان‌های بیشینه‌ی ۱۷۰ تا ۲۰۵ کیلووات تولید می‌گردد. قابل‌توجه است که تمامی این موتورها وزن یکسان دارند. تنها با ایجاد یک قید فیزیکی در ساختار موتور، مقدار توان بیشینه‌ی آنها متناظر با کاربردهای گوناگون محدود شده است. با درنظر گرفتن این امر، موتور OM906LA با توان بیشینه‌ی ۲۰۵ کیلووات انتخاب می‌گردد. این

موتور ۱۱۰ نیوتن‌متر گشتاور تولید می‌نماید.

در سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید ارائه شده، پمپ-موتور هیدرولیکی به عنوان المان ثانویه‌ی تولید قدرت به کار رفته است. از این‌رو توان ماکزیمم آن به گونه‌ای انتخاب می‌شود که توانایی تولید توان بیشینه در شرایط حرکتی گذرای اتوبوس را متناظر با قیود ارائه شده در جدول ۴-۲ داشته باشد. همچنین با توجه به ساختار موازی سیستم قوای محرکه، ترکیب توانهای تولیدشده توسط دو المان تولیدقدرت به منظور ارضای شرایط ماکزیمم حرکتی که در شیب‌های بالا رخ می‌دهد، به کار می‌رود. این عملکرد، مزیت ساختار هیبرید موازی بر ساختار سری است که منجره کاهش سایز المان دوم سیستم قوای محرکه می‌گردد. درنهایت یک پمپ-موتور هیدرولیک محصول شرکت بوش-رکسروت انتخاب شده است. توان بیشینه‌ی این پمپ-موتور هیدرولیکی برابر با ۱۳۱ کیلووات است و گشتاوری معادل با ۶۹۵ نیوتن‌متر را تولید می‌نماید. انتخاب محصول شرکت بوش-رکسروت با توجه به قیود موجود در بازار برای تأمین قطعات موردنیاز انجام گرفته است. مشخصات این پمپ - موتور در جدول ۴-۶ نمایش داده شده است. در مورد سایزینگ آکومولاتورهای هیدرولیکی،

جدول ۴-۶: مشخصات پمپ-موتور هیدرولیک محصول شرکت بوش-رکسروت [۳۴]

| مشخصه | مقدار |
|--------------------|----------------------|
| بیشینه‌ی جابجایی | ۱۲۵ cm ³ |
| بیشینه‌ی سرعت | ۲۲۰۰ rpm |
| بیشینه‌ی دیی | ۲۲۵ lit/min |
| بیشینه‌ی فشار کاری | ۳۵۰ bar |
| بیشینه‌ی توان | ۱۳۱ kW |
| بیشینه‌ی گشتاور | ۶۹۶ Nm |
| وزن | ۸۸ kg |
| طول، عرض، ارتفاع | ۳۶۰ ، ۳۱۰ ، ۳۵۴ (mm) |

تنها به یک انتخاب اولیه بسته می‌شود. از این‌رو با توجه به طراحی سیستم‌های مشابه، ۸ عدد آکومولاتور با ظرفیت نامی ۲۰ لیتر به عنوان انتخاب اولیه در نظر گرفته شده است. این آکومولاتورها نیز محصول شرکت بوش-رکسروت می‌باشند. مشخصات این نوع آکومولاتور که از نوع دیافراگمی^۴ است، براساس کاتالوگ شرکت مذکور در جدول ۴-۷ ارائه شده است. طراحی نهایی حجم و تعداد موردنیاز آکومولاتورها در انتهای فصل مدل‌سازی ارائه شده است. این امر به منظور لحاظ نمودن تأثیر روند مصرف و تولید انرژی در سیکل رانندگی انجام گرفته است.

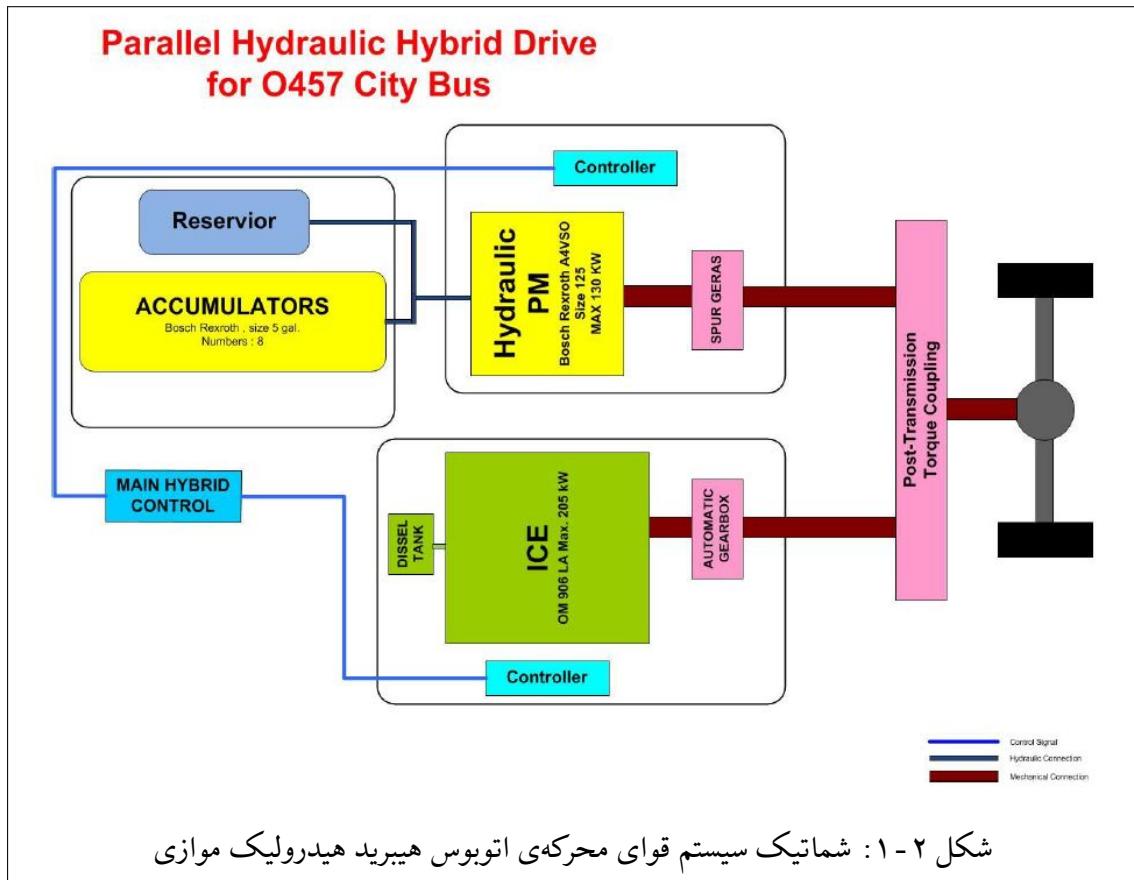
^۴ Bladder

جدول ۲ - ۷: مشخصات آکومولاتور هیدرولیکی محصول شرکت بوش-رسروت [۳۵]

| مشخصه | مقدار |
|--------------------|----------------|
| بیشینه‌ی فشار کاری | ۳۴۵ bar |
| حجم نامی | ۲۰ lit |
| وزن خام | ۱۰۰ kg |
| طول، قطر | ۲۴۳ ، ۸۸۹ (mm) |

۴ - ۲ ساختار نهایی سیستم قوای محرکه‌ی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی

در ساختار سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک موازی ارائه شده، علاوه بر سه المان اصلی سیستم ادوات دیگری نیز وجود دارند. در این سیستم از یک کوپلینگ گشتاور بعد از دو المان تولید قدرت استفاده شده است. وظیفه‌ی کوپلینگ گشتاور، ترکیب گشتاورهای رسیده از دو المان تولید قدرت و ارسال گشتاور مجموع به چرخ‌های اتوبوس می‌باشد [۲]. این کوپلینگ شامل دو چرخدنده با نسبت دنده‌ی برابر است. با استفاده از کوپلینگ گشتاور بعد از دو المان تولید قدرت، امکان اصلاح گشتاور خروجی هر المان توسط گیربکس‌های مناسب بلا فاصله بعد از هر المان وجود دارد. با توجه به امکان عملکرد پمپ-موتور هیدرولیکی در محدوده وسیعی از سرعت دورانی محور، تنها یک گیربکس ساده با یک دنده دارای ضریب دنده‌ی ۱/۷۵ جهت اصلاح گشتاور تولید شده توسط آن استفاده شده است. انتخاب این نسبت دنده به منظور تطابق محدوده‌ی سرعت محورهای خروجی پمپ-موتور هیدرولیکی و موتور احتراق داخلی صورت گرفته است. همچنین برای اصلاح گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی از گیربکس اتوماتیک موجود در اتوبوس متعارف استفاده شده است. با توجه به برابری محدوده سرعت موتور احتراق داخلی OM906LA با این محدوده در موتور موجود در اتوبوس متعارف O457 (موتور OM457LA)، گیربکس موجود در اتوبوس متعارف در اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی نیز قابل استفاده می‌باشد. این گیربکس دارای ۴ دنده می‌باشد. در پایان شماتیک ساختار سیستم قوای محرکه‌ی ارائه شده در شکل ۱ - ۲ نشان داده شده است. یک استراتژی کنترل وظیفه‌ی مدیریت انرژی را در این سیستم بر عهده دارد.



فصل ۳

مدل سازی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی

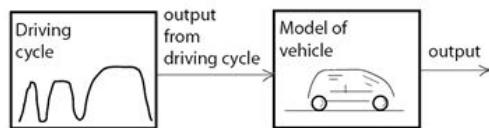
در این فصل روند مدل سازی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی ارائه شده است. ابتدا بلوک ایجاد شده متاظر با هریک از قطعات سیستم محرکه در نرم افزار MATLAB/Simulink معرفی شده است. در این بخش، بیشترین تأکید بر نحوه اعمال بازدهی عملکرد قطعات در نرم افزار است. مجموع بلوک های ارائه شده برای هر قطعه، مدل نهایی سیستم محرکه ای اتوبوس هیبرید هیدرولیک را تشکیل می دهد. همچنین در این بخش تأیید صحت مدل های ساخته شده برای پمپ-موتور، آکومولاتورها و مجموعه هی موتور احتراق داخلی و گیربکس نیز بیان شده است. در پایان، روند سایزینگ آکومولاتورهای هیدرولیکی پس از اتمام مدل سازی اتوبوس ارائه شده است.

طراحی خودرو یک فرایند پرهزینه و زمان بر است که طی آن ابتدا مشخصات کلی سیستم و اجزای آن مشخص می شود. در مرحله بعد جزئیات طراحی این اجزا مشخص می شود و درنهایت با ساخت و تست یک مدل اولیه^۱ پایان می پذیرد. این هزینه و زمان هنگفت به کمک مدل سازی و شبیه سازی رایانه ای بهشت کاهش می یابد. مدل سازی خودرو معمولاً^۲ به دو صورت رو به جلو^۳ و رو به عقب^۴ انجام می شود. شکل ۱-۳ تفاوت پیاده سازی این دو روش را نشان می دهد.

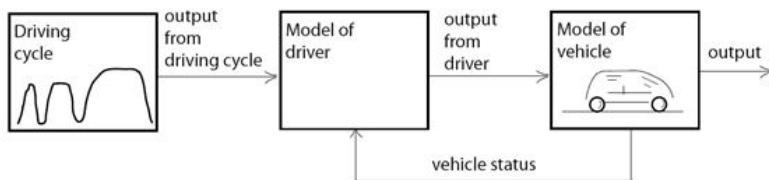
در مدل سازی رو به عقب، مانند نرم افزار ADVISOR، فرض می شود که سیکل رانندگی ورودی دقیقاً پیموده می شود و بعد توان لازم برای این پیمایش، گشتاور و سرعت در هریک از اجزای سیستم انتقال قدرت، مصرف سوخت و سایر پارامترها محاسبه می گردد. همان طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می شود، در مدل سازی با این روش به مدل راننده احتیاجی نیست. اما در مدل سازی رو به جلو، که به عملکرد واقعی خودرو نزدیک تر است، راننده سیکل رانندگی را می بیند و مناسب با آن فرمان گاز یا ترمز می دهد. درنتیجه پاسخ خودرو مناسب با فشردگی پدال گاز یا ترمز خواهد بود. برای آنکه خودرو بتواند یک پروفیل سرعت یا یک سیکل رانندگی را بپیماید، لازم است که یک پیغام مرجع به مدل راننده داده شود. این نوع مدل سازی علی رغم دشواری هایی که دارد، از آنجا که جریان اطلاعات در آن مانند یک خودروی واقعی است، پیش بینی

^۱Prototype

^۲Feed Forward



الف) رو به عقب

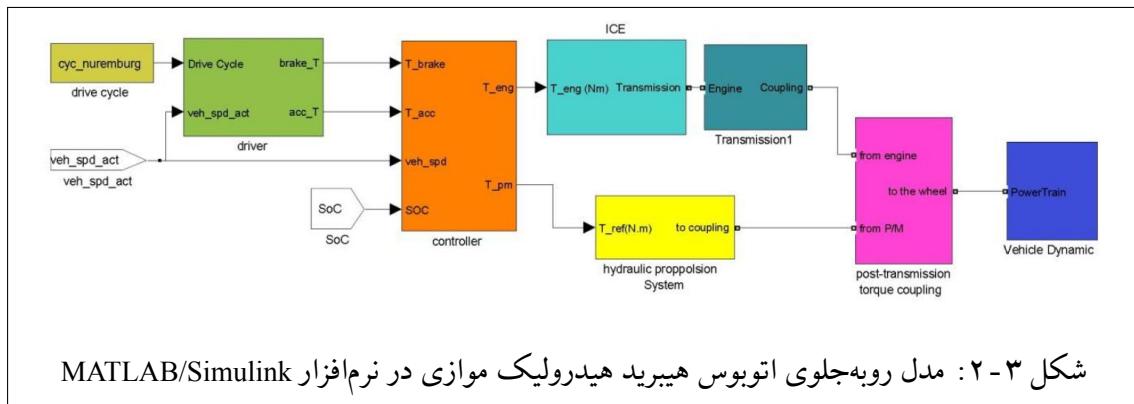


ب) رو به جلو

شکل ۳-۱: روش‌های مدل‌سازی خودرو. (الف) رو به عقب، (ب) رو به جلو

دقیق‌تری از رفتار خودرو ارائه می‌دهد. این روش مدل‌سازی که حجم پردازش به مرتب بیشتری نسبت به روش رو به عقب طلب می‌کند، معمولاً هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که پدیده‌های دینامیکی خودرو یا اجزای آن بیشتر مورد توجه باشند. در حالی که در روش قبلی می‌توان به آسانی با هر بار برآورده اجزا، کارکرد خودرو را مورد مطالعه قرار داد.

در شکل ۲-۳ مدل ارائه شده در نرم‌افزار MATLAB/Simulink برای شبیه‌سازی اتوبوس مشاهده می‌شود. در این مدل رو به جلو راننده با توجه به اختلاف سرعت فعلی و سرعت مطلوب، پدال گاز یا ترمز را فشار می‌دهد. در ادامه در یک بلوك محاسباتی، این فشرده شدن پدال‌ها به گشتاور مورد نیاز تبدیل و به کنترل مرکزی فرستاده می‌شود. کنترل کننده مرکزی، قسمت اصلی مدل اتوبوس هیبرید است که براساس استراتژی کنترل و متغیرهای ورودی، سهم هر یک از دو منبع قدرت را در تولید گشتاور مورد نیاز خودرو مشخص و به بلوك‌های مربوطه ارسال می‌کند. گشتاور ارسال شده از طرف کنترلر مرکزی، وارد بلوك‌های موتور احتراق داخلی و پمپ - موتور هیدرولیکی می‌شود و گشتاور مورد نظر تأمین می‌گردد. بین موتور احتراق داخلی و کوپلینگ، بلوك گیربکس چندسرعته قرار دارد. درنهایت این دو گشتاور در بلوك کوپلینگ با یکدیگر جمع می‌شود و پس از عبور از دیفرانسیل به محور چرخ‌ها انتقال می‌یابد. دردامنه چگونگی مدل‌سازی هر یک از المان‌ها و بدنبال آن مدل کل اتوبوس توضیح داده شده است. به‌منظور مدل‌سازی واقعی جریان توان در سیستم تولید و انتقال قدرت از بلوك‌های ابزار SimDriveline در نرم‌افزار MATLAB/Simulink استفاده شده است.



شکل ۲-۳: مدل روبه‌جلوی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink

۱-۳ سیکل رانندگی

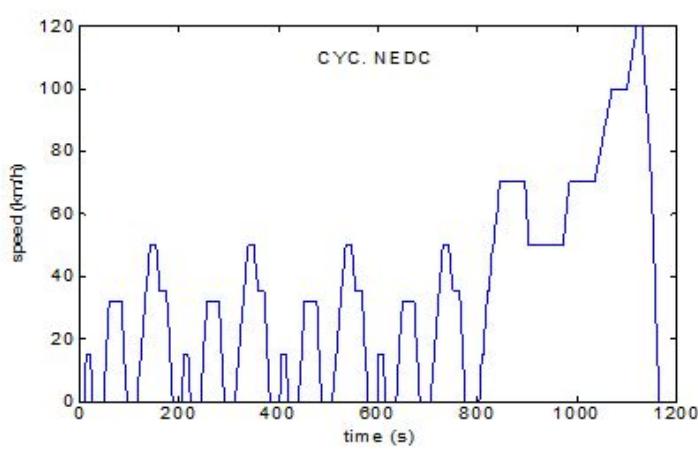
سیکل رانندگی^۴، یک منحنی سرعت برحسب زمان است که برای نشان دادن الگوی رانندگی یک وسیلهٔ نقلیهٔ خاص و در محیط حرکتی مورد نظر به کار می‌رود. هدف عمدۀ در تدوین سیکل‌های رانندگی خودروها اندازه‌گیری میزان مصرف سوخت و آلایندگی خودروها به‌وسیلهٔ انجام تست‌های شاسی دینامومتر یا شبیه‌سازی می‌باشد. سیکل‌های رانندگی دو نوع عمدۀ می‌باشند: گذرا و مodal. سیکل‌های گذرا، علاوه‌بر شرایط پایدار سرعت ثابت، شرایط گذرای شتاب‌گیری و ترمز‌گیری را نیز شبیه‌سازی می‌کنند؛ مانند سیکل‌های رانندگی شهرهای تهران، منتهن و نورمبورگ. سیکل‌های مodal، الگوی واقعی رانندگی را بیان نمی‌کنند و در بازه‌های کوتاه زمانی سرعت آنها ثابت است؛ مانند سیکل رانندگی NEDC. این تست‌ها شرایط گذرا، یعنی شتاب‌گیری و ترمز‌گیری را که مقدار زیادی از مصرف سوخت ناشی از آن می‌باشد، نادیده می‌گیرند. نمونه‌ای از یک سیکل رانندگی مodal و یک سیکل رانندگی گذرا در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

۲-۳ مدل راننده

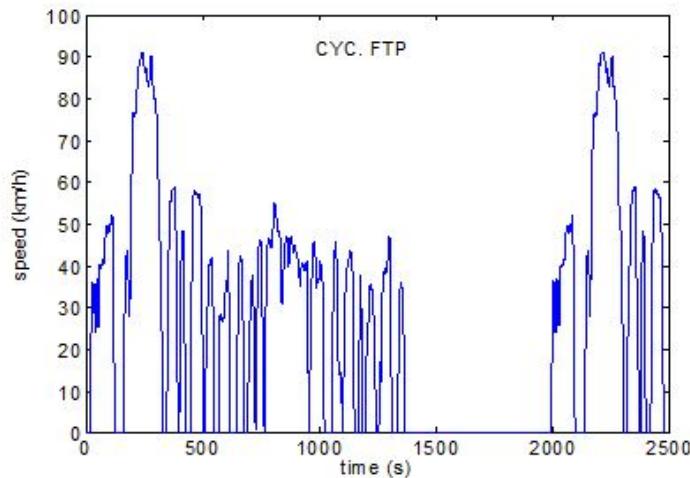
راننده در واقعیت با مقایسه سرعت فعلی خودرو و سرعت مطلوب سیکل رانندگی، پدال گاز یا ترمز را فشار می‌دهد. در این پروژه از یک کنترل کننده PID استفاده شده است که با توجه به اختلاف سرعت واقعی و مطلوب خودرو، گشتاور لازم را فرمان می‌دهد. شکل ۲-۴ مدل ارائه شده برای راننده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۵-۳، کنترلر PID راننده، مشاهده می‌شود.

در طراحی مدل راننده مشاهده شد که کنترلر تناسبی به تنهایی می‌تواند سیکل رانندگی را به‌طور مناسب دنبال کند، اما نوسانات پاسخ سیستم را اصلاح نمی‌کند. همچنین انتگرال خطای سرعت منجر به آن می‌شود که مسافت طی شده توسط خودرو با طول واقعی سیکل رانندگی اختلاف داشته باشد. برای بهبود رفتار سیستم کنترلرهای دیفرانسیلی و انتگرالی اضافه و رفتار سیستم در حالت‌های مختلف مقایسه شد. مهمترین خاصیت کنترلر انتگرالی آن است که خطای حالت ماندگار سیستم را صفر می‌کند. در مقابل کنترلر دیفرانسیلی، سیستم مدار بسته را پایدارتر کرده و فرجهش را کاهش می‌دهد. باید توجه داشت تنظیم پارامترهای کنترلر در پیش‌بینی رفتار خودرو بسیار تعیین کننده می‌باشد. پارامترهای کنترلر PID با توجه به تأثیر هر کدام از

^۴ Driving Cycle

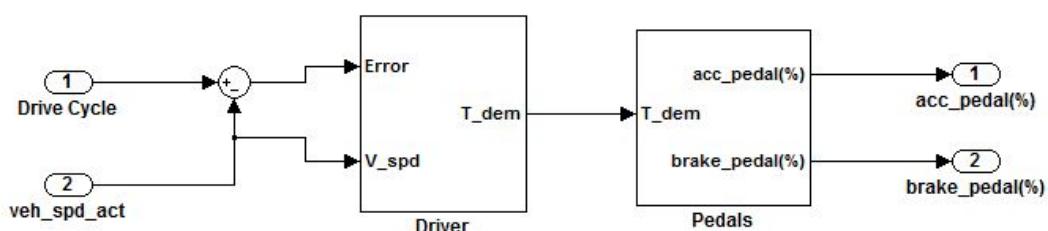


(الف)

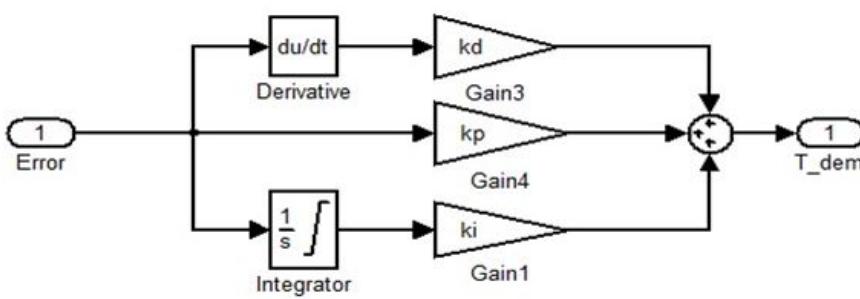


(ب)

شکل ۳-۳: (الف) سیکل رانندگی مودال NEDC ، (ب) سیکل رانندگی گذرای FTP



شکل ۳-۴: مدل راننده در Simulink



شکل ۳-۵: کنترلر PID راننده

جدول ۱-۳: ضرایب کنترلر PID

| مقدار | ضریب کنترلی |
|-------|-------------|
| ۱۰۰۰۰ | K_P |
| ۱۰۰ | K_I |
| ۰ | K_D |

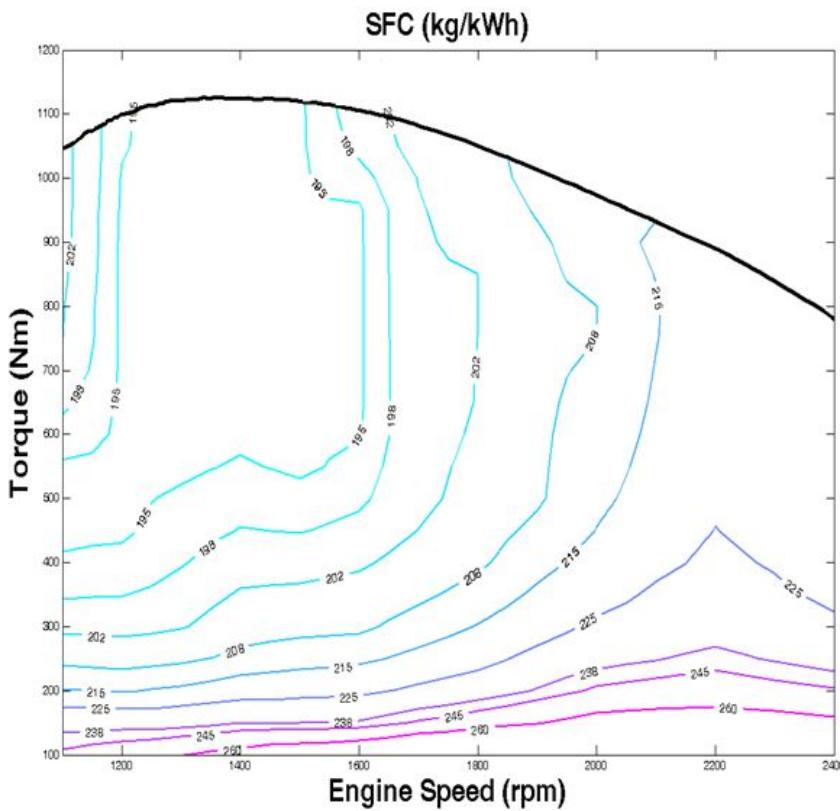
ضرایب، با روش سعی و خطای تنظیم شده‌اند. در نهایت، پس از تست مقادیر مختلف پارامترها، مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۳ انتخاب گردید. برای تعیین پدال گاز و ترمز، می‌بایست رابطه بین گشتاور درخواستی و زاویه پدال معلوم باشد. در اینجا این رابطه خطی فرض شده است. لذا با توجه به نسبت گشتاور درخواستی به حداکثر گشتاور مجاز موتور احتراق داخلی، درصد فشردگی پدال تعیین شده است.

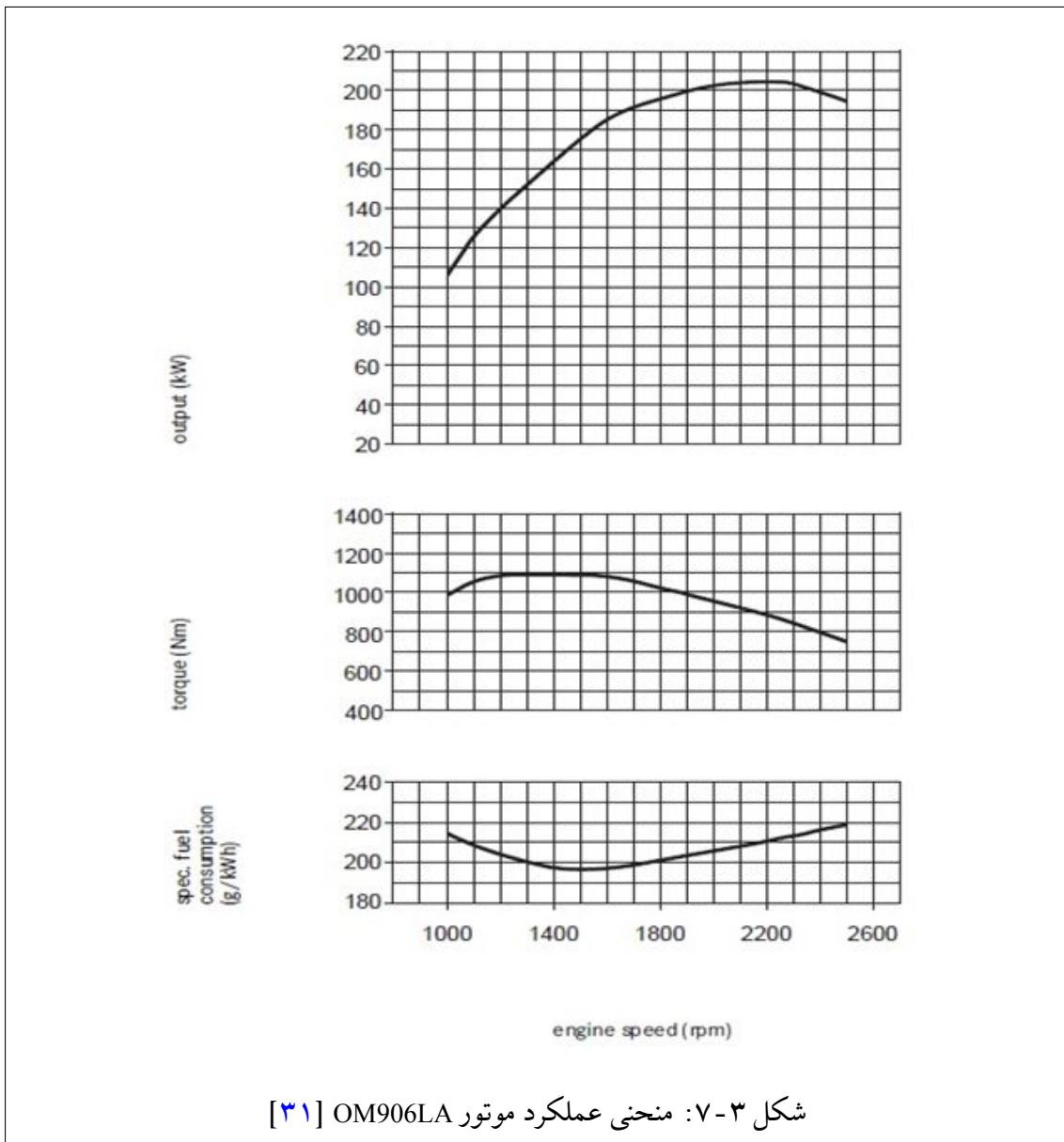
۳-۳ مدل موتور احتراق داخلی

موتور احتراق داخلی انتخاب شده برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازنی، ساخت شرکت ایدم مدل ۹۰۶ LA با حداکثر توان ۲۰۵ کیلووات و وزن ۵۵۵ کیلوگرم می‌باشد. گشتاور موتور OM906LA برابر با ۱۱۰۰ نیوتن‌متر است. این موتور نسبت به موتور احتراق داخلی اتوبوس معمولی (موتور OM457LA) با توان حداکثر ۲۲۰ کیلووات و وزن ۹۲۰ کیلوگرم) کوچک‌تر، سبک‌تر و درنتیجه کم مصرف‌تر می‌باشد. منحنی مصرف سوخت این موتور در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.

بلوک موتور احتراق داخلی شامل ۵ مشخصه است که برای موتورهای مختلف، متفاوت می‌باشد:

- بلوک محاسبه‌ی مصرف سوخت موتور. برای تعیین مصرف سوخت، یک بلوک محاسباتی درنظر گرفته شده است که در آن با توجه به منحنی مصرف سوخت موتور احتراق داخلی بر حسب سرعت دورانی و توان تولیدی، یک جدول جستجو ایجاد شده است. خروجی این بلوک مصرف سوخت موتور



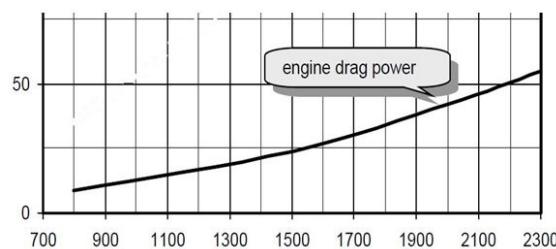


[۳۱] شکل ۷-۳: منحنی عملکرد موتور OM906LA

• گشتاور مقاوم موتور^۶. در حالاتی از حرکت خودرو که موتور احتراق داخلی به محور چرخ‌ها متصل است ولی گشتاوری تولید نمی‌کند (پدال گاز فشرده نمی‌شود)، مانند حرکت در سرashیبی درحالی که گیربکس درگیر باشد ولی پای راننده روی پدال گاز نباشد، موتور مانند یک کمپرسور هوا عمل کرده و گشتاور منفی تولید می‌نماید. این گشتاور منفی تأثیری بر میزان مصرف سوخت ندارد و فقط مانند یک گشتاور ترمزی عمل می‌کند. این مورد نیز براساس شکل ۸-۳ موجود در کاتالوگ موتور موردنظر در مدل قرار داده شده است.

بلوک نهایی موتور احتراق داخلی در ضمیمه نشان داده شده است.

^۶ Engine Drag Torque



شکل ۴-۳: منحنی توان مقاوم موتور [۳۲] OM906LA

جدول ۴-۳: مقادیر ضرائب دنده‌ی گیربکس اتوماتیک PID

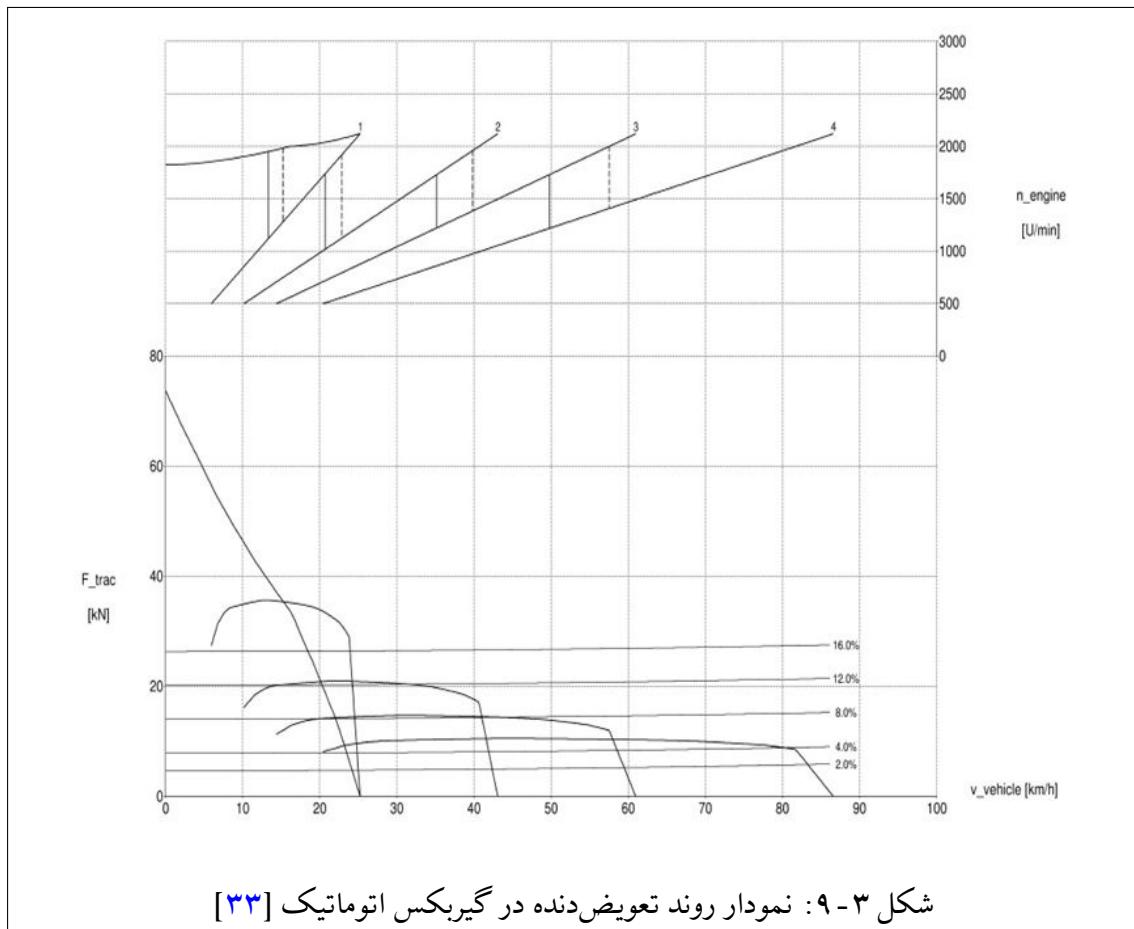
| ضریب دنده | شماره دنده |
|-----------|------------|
| ۳/۴۳ | ۱ |
| ۲/۰۱ | ۲ |
| ۱/۴۲ | ۳ |
| ۱ | ۴ |

۴-۳ مدل گیربکس اتوماتیک

همان‌طور که در بخش طراحی اشاره شد، برای بهبود گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی، از یک گیربکس اتوماتیک چهارسرعته استفاده شده است. مدل گیربکس اتوماتیک، از سه قسمت تشکیل شده است:

- کنترل گیربکس. این بلوک براساس سرعت خودرو و با استفاده از یک روند مشخص که در کاتالوگ گیربکس به صورت یک نمودار (شکل ۹-۳) بیان شده است، دنده مورد نظر را انتخاب می‌کند و به بلوک جعبه دنده فرمان می‌فرستد. روند تعویض دنده در این بلوک به کمک یک بلوک جریان حالت^۱ اعمال شده است.
- جعبه دنده. این بلوک شامل چهار چرخدنده با نسبت دنده‌های متفاوت است که براساس فرمان بلوک کنترل گیربکس، چرخدنده‌ی مورد نظر انتخاب می‌شود. ضریب دنده‌های چهارگانه‌ی مذکور در جدول ۴-۳ آمده است.
- مبدل گشتاور^۲. مبدل گشتاور یک مجموعه هیدرولیکی است که در گیربکس‌های اتوماتیک به جای کلاچ به کار می‌رود و حرکت خودرو را هموارتر می‌نماید. این قطعه شامل دو جزء اصلی می‌باشد. گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی به پمپ منتقل می‌شود. با گردش پمپ، سیال

^۱State Flow^۲Torque Converter

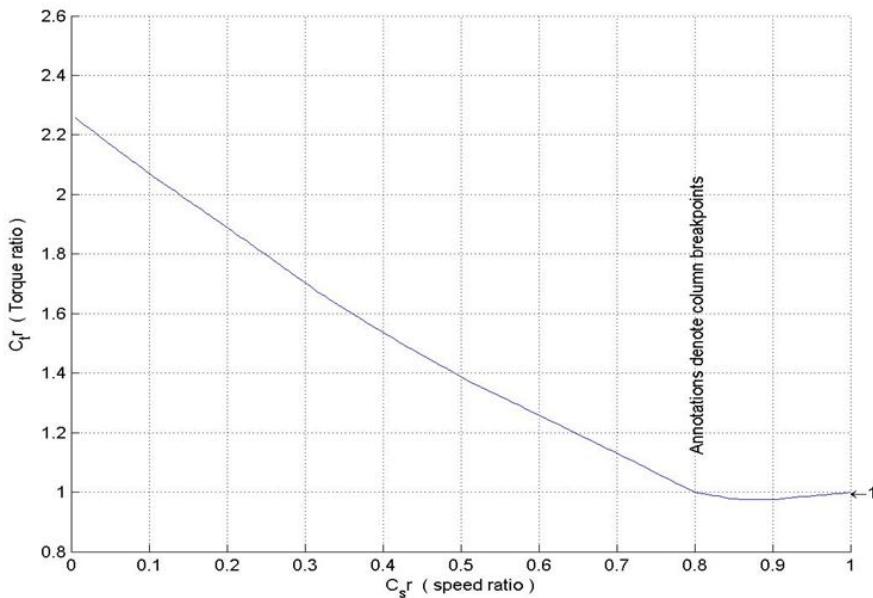


شکل ۴-۳: نمودار روند تعویض دنده در گیربکس اتوماتیک [۳۳]

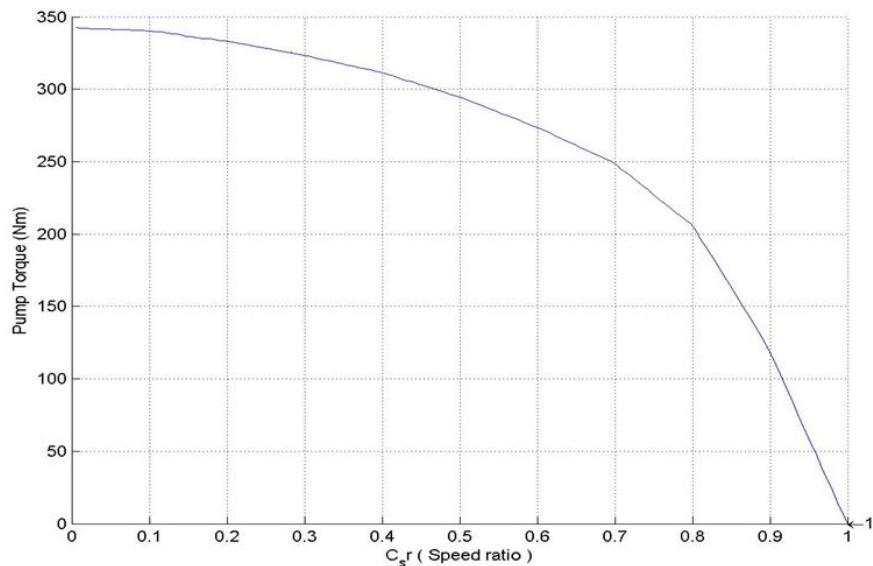
جريان پیدا کرده و توربین مجموعه را به حرکت در می‌آورد. محور توربین، به محور ورودی قسمت اصلی گیربکس متصل است. مدل‌سازی مبدل گشتاور براساس سه کمیت که هر سه کمیت از کاتالوگ گیربکس موردنظر قابل استخراج است، انجام شده است:

۱. نسبت سرعت (C_{sr}). این کمیت برابر با نسبت سرعت دورانی توربین به سرعت دورانی پمپ در هر لحظه است.
۲. نسبت گشتاور (C_{tr}). این کمیت برابر با نسبت گشتاور توربین به گشتاور پمپ مبدل در هر لحظه است. این مقدار با توجه به مقدار نسبت سرعت تعیین می‌گردد (شکل ۱۰-۳)
۳. گشتاور پمپ T_p . این کمیت گشتاور دریافتی پمپ مبدل است. از آنجا که مبدل گشتاور بازده ۱۰۰ درصد ندارد و با افت گشتاور قابل ملاحظه‌ای همراه است، جهت مدل‌سازی دقیق مبدل گشتاور باید بازده آن را در هر دور درنظر گرفت. با استفاده از نموداری که در کاتالوگ گیربکس موردنظر ارائه شده است، یک جدول جستجو در Simulink ایجاد و مقادیر نمودار مذکور به آن داده شده است. در هنگام شبیه‌سازی مدل، این جدول جستجو مقادیر نسبت سرعت را به عنوان ورودی می‌گیرد و گشتاور پمپ را در هر لحظه به عنوان خروجی می‌دهد (شکل ۱۱-۳)

درنهایت، مقدار گشتاور خروجی مبدل گشتاور با استفاده از رابطه‌ی



شکل ۳-۱۰: نمودار نسبت گشتاور برحسب نسبت سرعت در مدل گشتاور



شکل ۳-۱۱: نمودار گشتاور پمپ برحسب نسبت سرعت در مدل گشتاور

$$T_{out} = \left(T_p \left(\frac{n_e}{1000} \right)^{\gamma} \right) C_{tr} \quad (1-3)$$

تعیین می‌گردد. در این رابطه، n_e سرعت دورانی محور خروجی موتور احتراق داخلی است.

در مدل اتویوس، یک بلوك مجزا جهت مدل‌سازی گیربکس درنظر گرفته شده است که شامل هر سه قسمت کنترل گیربکس، جعبه‌دنده و مدل گشتاور می‌باشد. ورودی این بلوك شافت خروجی موتور

احتراق داخلی و اطلاعات مربوط به گشتاور و سرعت دورانی آن است. خروجی این بلوک به عنوان گشتاور اصلاح شده وارد بلوک دینامیک اتوبوس می‌شود. بلوک نهایی گیربکس در ضمیمه آمده است.

۵-۳ مدل پمپ-موتور هیدرولیکی

برای مدل سازی پمپ-موتور هیدرولیکی، دو قسمت اصلی به طور جداگانه مدل شده است؛ یکی کارکرد پمپ-موتور که خروجی آن گشتاور است و دیگری کنترلر پمپ-موتور که وظیفه کنترل گشتاور خروجی پمپ-موتور را با توجه به فرمانی که از کنترلر مرکزی هیبرید می‌گیرد، بر عهده دارد.

مدل پمپ-موتور

براساس سایزینگ انجام شده، پمپ - موتور سایز ۱۲۵ شرکت بوش رکسروت، انتخاب گردیده است. در کاتالوگ این قطعه، روابط کارکرد آن ارائه شده که تفاوت این روابط در دو حالت پمپی و موتوری، فقط در نحوه اعمال بازده است. به عنوان مثال:

- در حالت پمپی، سرعت شافت خروجی از طریق گشتاور خارجی تأمین می‌شود و دی پمپ به عنوان مورد مطلوب، از پمپ دریافت می‌گردد. بنابراین بازده حجمی در این حالت برابر با نسبت دی پمپ به حاصل ضرب سرعت شافت آن در مقدار جابجایی است.
- در حالت موتوری، دی موتور به عنوان عامل ورودی اعمال می‌شود و سرعت شافت خروجی آن، مورد مطلوب است. بنابراین بازده حجمی در این حالت برابر با نسبت حاصل ضرب سرعت شافت خروجی موتور در مقدار جابجایی آن به مقدار دی موتور است.

تفاوت بازده حجمی در حالت پمپی و موتوری در مورد بازده های مکانیکی و کلی پمپ-موتور نیز صادق است. در این مرحله می‌توان بازده های حجمی، مکانیکی و کلی پمپ-موتور در دو حالت پمپی و موتوری را یکسان در نظر گرفت. البته باید دقت نمود که نحوه اعمال بازده ها در حالت موتوری، عکس نحوه اعمال آنها در حالت پمپی است. روابط مربوط به تعیین دی، گشتاور و توان پمپ-موتور در حالت پمپی به صورت

$$q_v = \frac{v_g \times n \times \eta_v}{1000} \quad (2-3)$$

$$T = \frac{v_g \times \delta p}{20 \times \pi \times \eta_{mh}} \quad (3-3)$$

$$P = \frac{2\pi \times T \times n}{600} = \frac{q_v \times \delta p}{600 \times \eta_t} \quad (4-3)$$

و در حالت موتوری برابر با

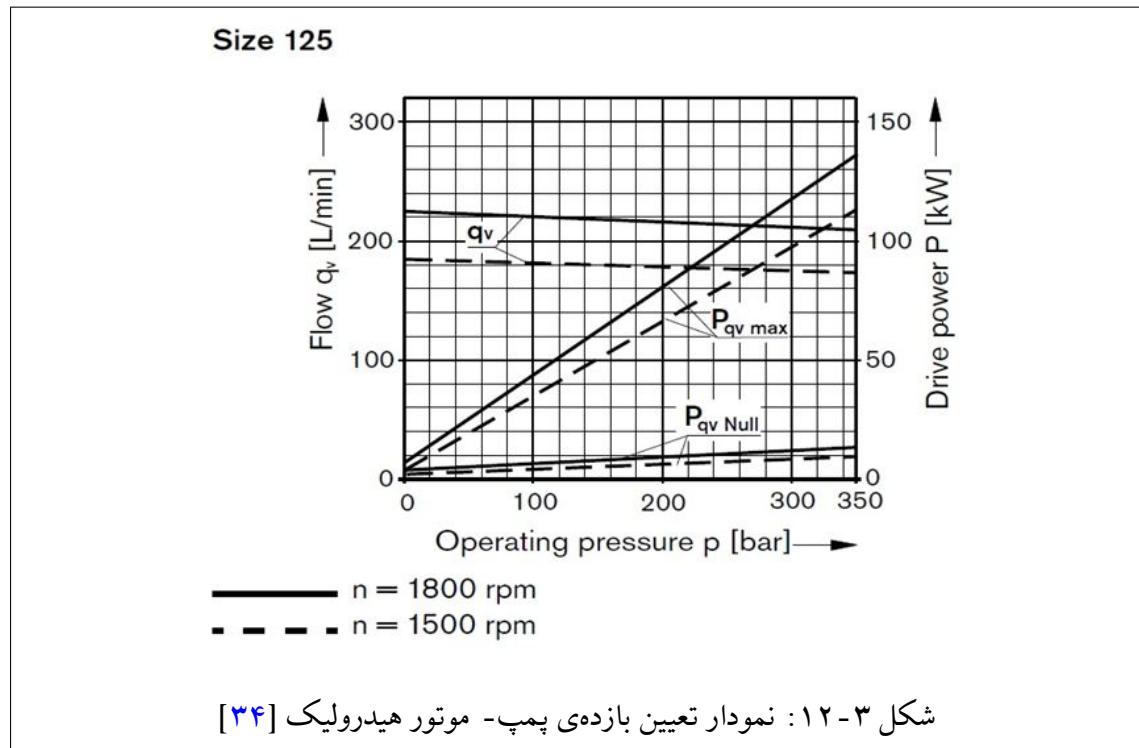
$$q_v = \frac{v_g \times n}{1000 \times \eta_v} \quad (5-3)$$

$$T = \frac{v_g \times \delta p \times \eta_{mh}}{20 \times \pi} \quad (6-3)$$

$$P = \frac{2\pi \times T \times n}{600} = \frac{q_v \times \delta p \times \eta_t}{600} \quad (7-3)$$

می باشد. در روابط فوق، q_v دلی بر حسب v_g lit/min، η_t جابجایی پمپ-موتور بر حسب cm^3 ، سرعت شافت پمپ-موتور بر حسب n rpm، δp اختلاف فشار بین دو مخزن پرفشار و کم فشار بر حسب bar، T گشتاور بر حسب Nm و P توان بر حسب kW است. همچنین بازدههای حجمی، مکانیکی-هیدرولیکی و کلی پمپ-موتور به ترتیب با η_v ، η_{mh} و η_t نشان داده شده اند.

همان طور که مشاهده می شود، مشخصه اصلی که پمپ-موتور براساس آن شناخته می شود، بازده های سه گانه ای آن هستند. در کاتالوگ مربوطه، برای هریک از اندازه های پمپ-موتور، یک نمودار ارائه شده است که نمودار مربوط به سایز ۱۲۵ در شکل ۱۲-۳ نمایش داده شده است.



در این نمودار مقادیر دو متغیر دبی (q_v) و توان ماکزیمم (P_{max}) برحسب مقادیر مختلف اختلاف فشار در دو سرعت نمونه ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه ارائه شده است. با استفاده از این نمودار و استخراج مقادیر q_v و P_{max} در سرعت‌های دیگر و همچنین استفاده از روابط

$$\eta_v = \frac{q_v \times 1000}{v_g \times n} \quad (8-3)$$

$$\eta_t = \frac{q_v \times \delta p}{P_{max} \times 600} \quad (9-3)$$

$$\eta_{mh} = \frac{\eta_t}{\eta_v} \quad (10-3)$$

می‌توان مقادیر بازده‌ها را تعیین نمود. محاسبات مربوط به جدول‌خوانی و تعیین بازده‌ها در مدل پمپ-موتور در دو بلوك مجزا انجام گرفته است. بلوك کلی پمپ-موتور در ضمیمه ارائه شده است.

کنترل پمپ-موتور

پمپ-موتور مورد استفاده از نوع جابجایی متغیر است. مقدار جابجایی پمپ-موتور با تغییر مقدار زاویه‌ی صفحه مورب^۹ آن تغییر می‌کند. منظور از کنترل پمپ-موتور، کنترل تغییرات زاویه صفحه مورب به‌منظور تولید گشتاور موردنظر می‌باشد. باید توجه شود که اگر زاویه صفحه مورب منفی باشد، مقدار جابجایی پمپ-موتور منفی خواهد بود و در حالت پمپی کار خواهد کرد. بر عکس، اگر این مقدار مثبت باشد پمپ-موتور در حالت موتوری کار می‌کند. بنابراین برای کنترل مقدار گشتاور خروجی از پمپ-موتور باید مقدار جابجایی که متناسب با زاویه صفحه مورب است را براساس مقدار گشتاور مرجعی که توسط کنترلر مرکزی هیبرید و متناظر با شرایط اتوبوس و خواست راننده تعیین می‌گردد، تنظیم نمود. به‌این منظور از یک کنترلر PID که ورودی آن خطای بین گشتاور خواسته‌شده و گشتاور تأمین‌شده توسط پمپ-موتور و خروجی آن مقدار جابجایی مطلوب پمپ-موتور است، استفاده شده است. در عمل این کنترل توسط یک سرو کنترلر^{۱۰} که به صفحه مورب متصل است و مقدار زاویه‌ی آن را تنظیم می‌کند، انجام می‌گیرد. ضرائب مناسب کنترلر PID مانند آنچه در مورد بلوك راننده گفته شد، براساس روش سعی و خطأ تعیین شده است. البته در اینجا بعد از کنترلر PID از یک جبران‌ساز پیش-فاز^{۱۱}، جهت ازبین بردن تأخیر فاز موجود در پاسخ مدل نیز استفاده شده است. این ضرائب به ترتیب $14/0$ برای K_p ، 14 برای K_i و صفر برای K_d می‌باشند. خروجی بلوك کنترلر پمپ-موتور، مقدار جابجایی پمپ-موتور برحسب cm^3 است. این مقدار نباید از مقدار بیشینه‌ی جابجایی پمپ-موتور بیشتر شود. مدل مربوط به کنترلر پمپ-موتور هیدرولیکی در ضمیمه ارائه شده است.

^۹Swash Plate

^{۱۰}Servo Controller

^{۱۱}Lead-Phase Compensator

۶-۳ مدل آکومولاتور

آکومولاتور در سیستم هیبرید هیدرولیکی، مانند باتری در سیستم هیبرید الکتریکی، وظیفه ذخیره انرژی را بر عهده دارد. در اینجا مدل سازی آکومولاتور براساس انتخاب اولیه در مرحله طراحی انجام شده است. البته در مدل آکومولاتور ساخته شده در محیط Simulink، دو نمونه آکومولاتور دیگر نیز مدل شده است که در صورت تغییر طراحی، امکان اعمال تغییرات روی مدل به راحتی وجود داشته باشد.

برای مدل کردن آکومولاتور ابتدا باید فرایند ترمودینامیکی مرجع برای گاز محبوس درون آکومولاتور تعیین شود. در کاتالوگ آکومولاتور مورد نظر پیشنهاد شده که در بیشتر مواقع از فرایند آدیاباتیک در مقابل فرایند هم‌دمای استفاده شود. در عمل نیز به نظر می‌رسد فرایند واقعی که گاز محبوس (نیتروژن) تحت آن کار می‌کند، آنقدر سریع انجام می‌پذیرد که امکان انتقال حرارت بین گاز و محیط وجود ندارد. سرعت فرایند تغییر حالت گاز آکومولاتور متناسب با فرکانس تقاضای گشتاور توسط کنترلر مرکزی هیبرید از پمپ-موتور است. البته این فرکانس با توجه به اکثر استراتژی‌های کنترل خودروی هیبرید موجود، مقدار بالایی می‌باشد. بنابراین، فرایند تغییر حالت گاز محبوس در آکومولاتور، آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر نوع فرایند، مقادیر کمترین و بیشترین فشار کاری سیستم هیدرولیک و همچنین فشار شارژ اولیه آکومولاتور نیز باید تعیین گردند. فشار بیشینه کاری پمپ-موتور برابر ۳۴۵ بار و فشار شارژ اولیه آکومولاتور (p_{pre}) ۱۴۴ بار می‌باشد. با توجه به این مقادیر و رابطه‌ی

$$p_{min} = \frac{p_{pre}}{0.9} \quad (11-3)$$

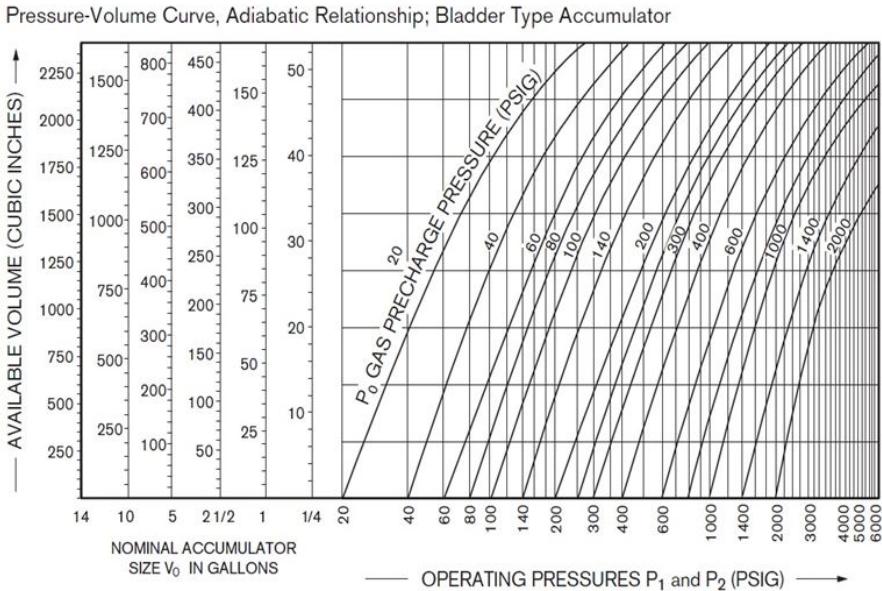
مقدار کمترین فشار کاری سیستم برابر با ۱۶۵ بار به دست می‌آید. خروجی مدل آکومولاتور شامل چهار متغیر زیر است:

- فشار آکومولاتور که برابر با فشار گاز محبوس در آن است (p_{accum}).
- سطح شارژ آکومولاتور که براساس حجم سیال درون آن بیان می‌شود (SOC).
- سطح شارژ مینیمم که توسط کمترین فشار کاری سیستم محدود می‌شود.
- حجم اولیه آکومولاتور که براساس سطح شارژ اولیه (ورودی سیستم) تعیین می‌شود.

برای به دست آوردن متغیرهای خروجی آکومولاتور، از نمودار حجم سیال قابل ذخیره‌سازی بر حسب فشارهای کاری سیستم استفاده می‌شود. این نمودار که در کاتالوگ محصول ارائه شده است، در شکل ۱۳-۳ مشاهده می‌شود. در مدل آکومولاتور، نمودار شکل ۱۳-۲ با استفاده از جداول جستجو برای سایزهای مختلف ایجاد شده است. این جداول جستجو، مقادیر بیشینه و کمینه حجم سیال قابل ذخیره‌سازی در آکومولاتور را محاسبه می‌نمایند. علاوه بر اطلاعات این نمودار، از رابطه‌ی فرایند آدیاباتیک برای بررسی عملکرد گاز آکومولاتور در حالات مختلف استفاده شده است. رابطه‌ی

$$p_0 \times v_0^n = p_1 \times v_1^n = p_2 \times v_2^n = p_x \times v_x^n \quad (12-3)$$

۶-۳ مدل آکومولاتور



شکل ۱۳-۳ : نمودار حجم سیال قابل ذخیره‌سازی بر حسب فشارهای کاری سیستم برای آکومولاتور [۳۵]

رابطه‌ی مذکور را بیان می‌کند. در این رابطه، فشارهای شارژ اولیه، کمینه و بیشینه‌ی فشار کاری سیستم به ترتیب با p_0 ، p_1 و p_2 و حجم گاز آکومولاتور متضاد با هر یک از حالات نیز به ترتیب با v_0 ، v_1 و v_2 نشان داده شده‌اند. مقادیر p_x و v_x فشار و حجم گاز آکومولاتور در حالت مجھول مورد نظر هستند. همچنین در این رابطه، n برابر با گرمای ویژه گاز است که برای نیتروژن (گاز معمول در آکومولاتورها) $1/4$ می‌باشد. با مرتع قراردادن یکی از حالات صفر، یک یا دو برای وضعیت گاز و با استفاده از رابطه‌ی (۱۲-۳)، مقدار فشار گاز در حالت مجھول براساس رابطه‌ی

$$p_x = p_1 \times \left(\frac{v_1}{v_x} \right)^n \quad (13-3)$$

به دست می‌آید. در رابطه‌ی (۱۳-۳) مقادیر p_1 و v_1 برای گاز آکومولاتور با استفاده از جداول جستجوی ذکرشده بدست می‌آیند. مقدار v_x با کم کردن حجم سیال مصرفی یا تولیدی توسط پمپ-موتور هیدرولیک در هر لحظه از مقدار گنجایش آکومولاتور ($20 \text{ lit} = v_0$) تعیین می‌گردد. حجم سیال مصرفی یا تولیدی توسط پمپ-موتور از طریق انگرال‌گیری دبی پمپ - موتور به صورت

$$v_{init} = SOC_{init} \times v_{max-fluid} \quad (14-3)$$

$$v_{x-fluid} = v_{init} + \int qvdt \quad (15-3)$$

$$v_{x-gas} = v_0 - v_{x-fluid} \quad (16-3)$$

بدست می‌آید. در رابطه‌ی (۱۶-۳)، SOC_{init} سطح شارژ اولیه‌ی آکومولاتور است که توسط کاربر وارد می‌شود و از طریق آن، مقدار حجم اولیه سیال در آکومولاتور (v_{init}) به دست می‌آید. برای تعیین سطح شارژ آکومولاتور در هر لحظه، از رابطه‌ی

$$SOC = \frac{v_{x-fluid}}{v_{max-fluid}} \times 100 \quad (17-3)$$

استفاده شده‌است. در این رابطه، نسبت حجم سیال موجود در آکومولاتور به مقدار حجم بیشینه‌ی قابل ذخیره‌سازی در آکومولاتور (متاظر با فشار بیشینه‌ی کاری آکومولاتور)، به عنوان سطح شارژ آکومولاتور در نظر گرفته شده‌است. بدیهی است مقدار SOC_{min} برابر با نسبت کمترین حجم سیال قابل ذخیره‌سازی در آکومولاتور به حجم بیشینه‌ی سیال قابل ذخیره‌سازی در آن است. کمترین حجم سیال در آکومولاتور جهت ارضای ملاحظات ایمنی آکومولاتور رعایت می‌گردد. مدل کامل آکومولاتور در ضمیمه ارائه شده‌است.

۷-۳ استراتژی کنترل قانونمند

پیش از مدل‌سازی کنترل مرکزی هیبرید، بایستی استراتژی کنترل هیبرید تعیین شود. در اینجا یک استراتژی قانونمند براساس شناخت طراح از سیستم محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک طراحی شده‌است. در این استراتژی کنترل، مودهای مختلف حرکت مشخص و برای هر یک نحوه عملکرد سیستم بیان شده‌است. در مورد اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی، گشتاور مطلوب راننده، سرعت اتوبوس، سطح شارژ آکومولاتور و اختلاف فشار بین دو مخزن کم‌فشار و پرفشار به عنوان چهار متغیر معیار در استراتژی کنترل قانونمند حاضر به کار رفته‌است. بدلیل آنکه در سرعت‌های پایین امکان شتاب گیری بالا و به‌تبع آن تقاضای گشتاور بالا از سوی راننده وجود دارد، اگر معیار تنها سرعت خودرو در نظر گرفته شود (به عنوان مثال از سرعت‌های پایین‌تر از ۲۵ کیلومتر بر ساعت گشتاور موردنیاز تنها از پمپ-موتور تأمین شود) با توجه به محدود بودن گشتاور پمپ-موتور، گشتاور موردنظر تأمین نخواهد شد. بنابراین خودرو به شرایط مورد نظر راننده نمی‌رسد. از این رو می‌بایست گشتاور و سرعت را به طور همزمان به عنوان معیار در نظر گرفت. همچنین بین سطح شارژ و اختلاف فشار ارتباط ریاضی وجود دارد؛ با این حال به‌منظور کاهش محاسبات در بلوک کنترل مرکزی هیبرید، از هر دو سیگنال استفاده شده‌است. در مورد استراتژی کنترل قانونمند دو نکته‌ی مهم وجود دارد:

- موtor احتراق داخلی در طول حرکت اتوبوس، خاموش نمی‌شود. بدلیل پایین بودن چگالی انرژی آکومولاتورها، سرعت پر و خالی شدن آنها بسیار بالا است. سرعت زیاد پر و خالی شدن آکومولاتورها، خاموش و روشن شدن سریع موتوor و همچنین تکرار این امر در دفعات زیاد منجر به سوختن موتوor می‌گردد. لحاظ نمودن این قید در استراتژی کنترل، روشن ماندن موتوor در تمام طول حرکت را به همراه دارد. همچنین توان مجموعه‌ی کمکی ^{۱۲} اتوبوس نیز در طول حرکت توسط موتوor احتراق داخلی تأمین می‌گردد. منظور

^{۱۲}Auxiliary System

از مجموعه‌ی کمکی، سیستم تأمین آب خنک‌کاری و هوا و روغن موردنیاز اتوبوس در سیستم‌های فرمان، تعلیق و ترمز است.

- امکان شارژ آکومولاتورها توسط موتور احتراق داخلی فراهم نشده‌است. این امر نیز بدلیل سرعت بالای پر و خالی شدن آکومولاتورهاست. چنانچه آکومولاتورها در طول شتاب‌گیری اتوبوس توسط موتور احتراق داخلی شارژ شوند، امکان بازیابی انرژی ترمی در مدت زمان ترمزگیری اتوبوس از بین می‌رود. بنابراین برای حفظ امکان بازیابی انرژی ترمی و ذخیره‌ی آن در آکومولاتورها، موتور احتراق داخلی به عنوان شارژکننده‌ی آکومولاتورها بکار نرفته‌است.

مودهای موجود در استراتژی کنترل قانون مند انتخاب شده برای اتوبوس هیدرولیک موازی به صورت زیر می‌باشد:

- مود ۱:** حالت شتاب‌گیری اتوبوس، گشتاور مطلوب راننده کمتر از گشتاور حدی T ، سرعت اتوبوس کمتر از سرعت حدی V و سطح شارژ آکومولاتور بیشتر از حداقل سطح شارژ مجاز (SOC_{min}) باشد. در این حالت، بیشترین گشتاوری که پمپ-مотор می‌تواند تأمین کند، به آن فرمان داده می‌شود و موتور احتراق داخلی مابقی گشتاور را تأمین خواهد نمود. برای تعیین بیشینه‌ی گشتاور پمپ-مotor هیدرولیک با داشتن اختلاف فشار بین دو مخزن، از رابطه‌ی (۱۸-۲) استفاده شده‌است. در این رابطه مقادیر v_g و η_{mh} با بیشترین مقادیر خود که به ترتیب برابر با ۱۲۵ و ۹/۰ می‌باشند، جایگزین شده‌است. بنابراین روابط تعیین مقدار گشتاور دو مؤلفه‌ی تولید قدرت به صورت

$$T_{pm} = \min(1/8 \times \delta p, T_{acc}), \quad T_{eng} = T_{acc} - T_{pm} \quad (18-3)$$

برای انتقال کنترلر از این مود به مودهای دیگر دو حالت در نظر گرفته شده‌است:

- اگر گشتاور مطلوب راننده بیشتر از گشتاور حدی T شود و سرعت اتوبوس بیشتر از سرعت حدی V شود، کنترلر به مود ۲ منتقل می‌شود.

- اگر سطح شارژ آکومولاتور به حداقل سطح شارژ مجاز (SOC_{min}) برسد، کنترلر به مود ۳ منتقل می‌شود.

- مود ۲:** حالت شتاب‌گیری، گشتاور مطلوب راننده بیشتر از گشتاور حدی T ، سرعت اتوبوس بیشتر از سرعت حدی V و سطح شارژ آکومولاتور بیشتر از حداقل سطح شارژ مجاز (SOC_{min}) باشد. در این حالت، موتور احتراق داخلی به عنوان منبع اصلی، گشتاور موردنیاز راننده را تأمین می‌نماید. در مود ۲، سه حالت کاری تعریف شده‌است:

- گشتاور مطلوب راننده کمتر از گشتاور حدی T_1 است. این حالت به منظور جلوگیری از بروز نوسان‌های با فرکانس بالا در سیگنال گشتاور فرمان پمپ-مотор لحاظ شده‌است. در عمل، پمپ-مotor هیدرولیکی و موتور احتراق داخلی توان تأمین گشتاورهای دارای نوسان با فرکانس

بالا را ندارند. در این حالت گشتاور پمپ-موتور از رابطه‌ی

$$T_{pm} = 1/8 \times \delta p \times \frac{T_1 - T_{acc}}{T_1 - T_0} \quad (19-3)$$

بدست می‌آید و مابقی گشتاور توسط موتور احتراق داخلی تأمین می‌گردد.

۲. گشتاور مطلوب راننده بیشتر از گشتاور حدی T_1 و کوچکتر از گشتاور حدی T_2 باشد. در این حالت گشتاور تولیدی توسط موتور احتراق داخلی برابر گشتاور مطلوب راننده خواهدبود و پمپ-موتور هیدرولیک گشتاوری تولید نمی‌کند.

۳. اگر گشتاور مطلوب راننده بیشتر از گشتاور حدی T_2 باشد، گشتاور تولیدی توسط موتور احتراق داخلی برابر T_2 است و مابقی گشتاور توسط پمپ-موتور هیدرولیکی تأمین می‌گردد.

برای انتقال کنترل از این مود به مودهای دیگر، دو حالت در نظر گرفته شدهاست:

- اگر گشتاور مطلوب راننده کمتر از گشتاور حدی T_0 شود، کنترلر به مود ۱ منتقل می‌گردد.

این درصورتی است که سطح شارژ بیشتر از حد پایین خود باشد.

- اگر سطح شارژ آکومولاتور به مقدار کمینه‌ی مجاز خود (SOC_{min}) برسد، کنترلر به مود ۳ می‌رود.

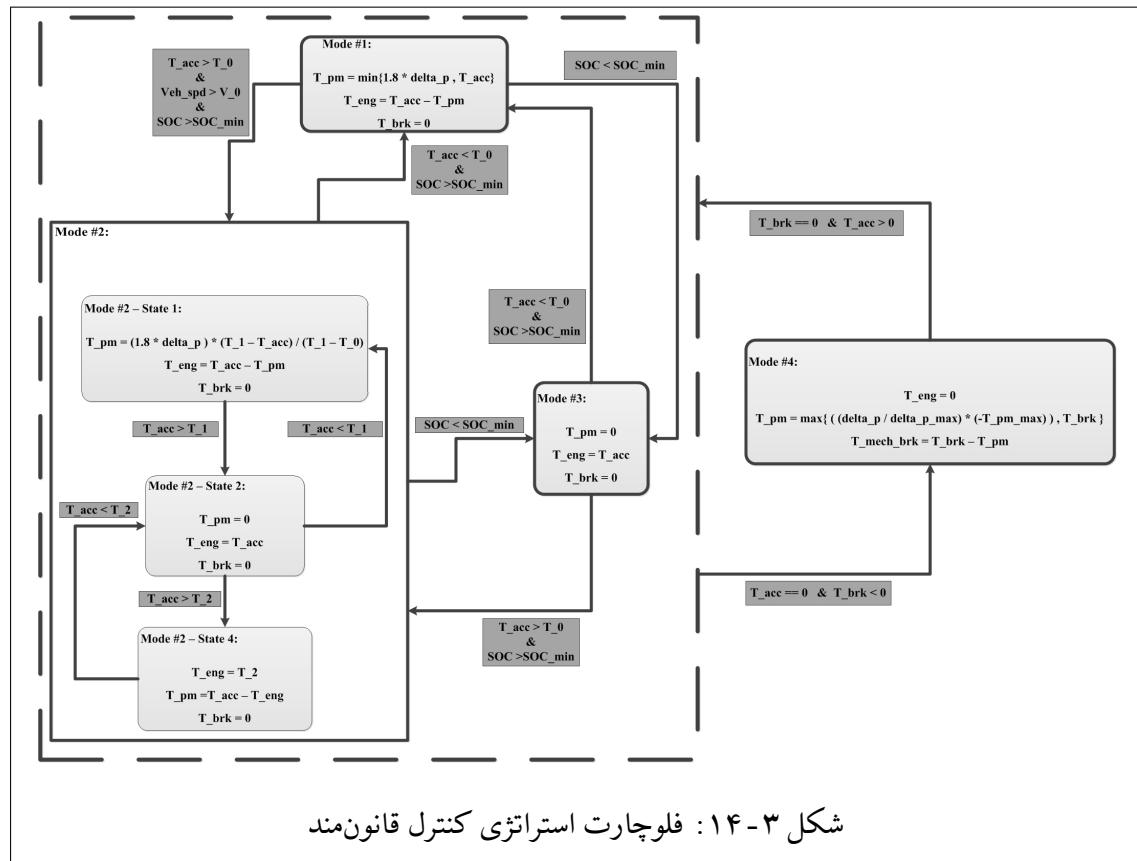
• **مود ۳:** خودرو در حالت شتاب‌گیری است و سطح شارژ آکومولاتور کمتر یا مساوی SOC_{min} باشد. در این مود حرکت، پمپ-موتور هیدرولیکی نمی‌تواند به عنوان منبع کمکی به کار رود و موتور احتراق داخلی به تنهایی احتیاجات گشتاور راننده را تأمین می‌نماید. چنانچه سطح شارژ از مقدار کمینه بالاتر رود و گشتاور مطلوب راننده کمتر از گشتاور حدی T_0 باشد، کنترلر به مود ۱ منتقل می‌شود. همچنین درصورت بالارفتن سطح شارژ و بیشتر بودن گشتاور مطلوب راننده از گشتاور حدی T_0 کنترلر به مود ۲ می‌رود.

• **مود ۴ :** خودرو در حالت ترمزگیری است. در این حالت، پمپ-موتور هیدرولیکی در حالت پیچی عمل می‌کند و بیشترین گشتاور منفی ممکن به آن فرمان داده می‌شود. گشتاور فرمان در این مرحله نیز مشابه رابطه‌ی (۱۸-۳) با توجه به مقدار اختلاف فشار بین دو مخزن کم‌فشار و پرفشار تعیین شدهاست. درصورت بیشتر بودن گشتاور فرمان ترمزگیری از مقدار گشتاور فرمان پمپ-موتور، مابقی گشتاور منفی موردنیاز اتوبوس توسط ترمز مکانیکی تأمین می‌گردد. بدیهی است در این مود، گشتاور موتور احتراق داخلی صفر است. بعلاوه حدود بالا و پایین سطح شارژ آکومولاتورها لحاظ شده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نحوه‌ی عملکرد استراتژی کنترل معرفی شده در بالا، تابع ۴ پارامتر حدی است. سه تا از این پارامترها مربوط به گشتاور مطلوب راننده و یکی مربوط به سرعت خودرو است. با اشراف بر ماهیت سیستم و البته انجام چندین سعی و خطا مقادیر این پارامترها به صورت جدول ۳-۳ تعیین شده است. در پایان، به‌منظور درک کامل نحوه‌ی عملکرد استراتژی کنترل قانونمند، یک فلوچارت در شکل ۱۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۳-۳: پارامترهای حدی در استراتژی کنترل قانونمند

| پارامتر | مقدار |
|---------|-------|
| ۵۰۰ | T_0 |
| ۶۰۰ | T_1 |
| ۱۰۰۰ | T_2 |
| ۵ | V_0 |



شکل ۳-۴: فلوچارت استراتژی کنترل قانونمند

۸-۳ مدل کنترلر مرکزی هیبرید

بعد از تعیین مشخصات استراتژی کنترل هیبرید، نوبت به مدل سازی بلوک کنترلر می‌رسد. بلوک کنترلر از دو مجموعه اصلی تشکیل شده است:

- بلوک محاسبه گشتاور جلوبرنده خواسته شده از پمپ-موتور هیدرولیکی و موتور احتراق داخلی. این بلوک براساس مودهای ۱ تا ۳ استراتژی کنترل سیستم هیبرید کار می‌کند. عملکرد کنترلر در هریک از مودهای حرکت اتوبوس توسط یک بلوک جریان حالت تأمین می‌گردد.

- بلوک محاسبه ترمنز بازیاب. در این بلوک برای انجام دقیق کار کنترل، یک سیگنال پسخور از گشتاور خروجی پمپ - موتور هیدرولیکی، وارد و به عنوان گشتاور منفی تولیدی توسط پمپ - موتور از آن استفاده شده است. خروجی این بلوک مقدار گشتاور ترمنزی است که توسط پمپ - موتور هیدرولیکی و ترمنز مکانیکی باید تأمین شود.

مدل کنترلر مرکزی هیبرید در ضمیمه نشان داده شده است.

۹-۳ مدل کوپلینگ

سیستم انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازنی، یک کوپلینگ گشتاور از نوع بعد از گیربکس می باشد. همان طور که در ابتدای این فصل بیان شد، در این سیستم هر یک از دو منبع قدرت یک گیربکس مجزا دارند. برای پمپ - موتور هیدرولیکی و با توجه به نمودار گشتاور هموار آن، تنها از یک جعبه دنده تک سرعته استفاده شده است. اما برای بهبود گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی از یک گیربکس اتوماتیک چهار سرعته استفاده شده است.

کوپلینگ گشتاور موردنیاز سیستم به کمک دو چرخ دنده (که یکی روی شافت خروجی پمپ - موتور و دیگری روی شافت خروجی گیربکس و موتور احتراق داخلی قرار دارد) مدل سازی شده است. از طرفی با توجه به سرعت های بیشینه دو منبع قدرت و سرعت بیشینه اتوبوس، ضریب دنده های مناسب تعیین شده است. این ضریب دنده برای چرخ دنده پمپ - موتور برابر با $1/75:1$ و برای موتور احتراق داخلی $1:1$ است. اتصالات مکانیکی مدل کوپلینگ و گیربکس با استفاده از بلوک های ابزار SimDriveline ایجاد شده است. این بلوک در ضمیمه نشان داده شده است.

۱۰-۳ مدل دینامیک خودرو

در عمل، گشتاور تولیدی موتور احتراق داخلی در سیستم انتقال قدرت و کوپلینگ تقویت گشته و با کمی اتلاف به چرخ ها اعمال می شود و نیروی پیشران به خودرو اعمال می شود. از طرفی نیروهای مقاوم اصطکاکی، مقاومت هوا و شبیجاده باعث شتاب منفی اتوبوس می گردد. برای مدل سازی دینامیک خودرو می توان یک مدل چند درجه آزادی پیچیده شامل کمک فنرها، سیستم ترمز و غیره را به کار برد، یا اینکه یک جرم متمرکز یک درجه آزادی در نظر گرفت. از آنجا که هدف مدل سازی تخمین میزان مصرف سوخت و ارزیابی عملکرد کلی اتوبوس بوده است، ساده سازی مدل اتوبوس به صورت یک جرم متمرکز برای مدل فعلی مناسب به نظر می رسد. همچنین از دینامیک عرضی و عمودی اتوبوس صرف نظر شده است. البته باید توجه داشت که جرم اتوبوس در معادلات، جرم مؤثر^{۱۳} در نظر گرفته شده است. توضیح جرم مؤثر اتوبوس بدین شرح است که موتور احتراق داخلی علاوه بر اینکه باید به جرم خودرو شتاب خطی بدهد، می بایست شتاب زاویه ای تمام

^{۱۳} Effective Mass

اجزای دوار را نیز تأمین کند. گشتاور لازم برای این شتاب‌گیری با استفاده از رابطه‌ی

$$T = I \times (G \frac{a}{r}) \quad (20-3)$$

بدست می‌آید. در رابطه‌ی فوق، I ممان اینرسی موتور احتراق داخلی، G ضریب تبدیل سرعت مجموع انتقال قدرت بین چرخ و موتور، a شتاب خطی اتوبوس و r شعاع چرخ اتوبوس است. ترم دوم، بیان کننده‌ی شتاب زاویه‌ای محور موتور و تمامی اجزای دوار متصل به آن است. گشتاور تولیدی موتور احتراق داخلی براساس رابطه‌ی

$$F = \frac{T \times G}{r} = (\frac{IG}{r^2}) \times a \quad (21-3)$$

بر سر چرخ‌ها نیروی جلوبرنده اعمال می‌کند. در رابطه‌ی بالا، ترم اول، جرم مؤثر اتوبوس را بیان می‌کند. در مدل ارائه شده برای دینامیک خودرو، ابتدا با توجه‌به گشتاور سر چرخ نیروی جلوبرنده محاسبه می‌شود. از طرفی نیروهای مقاوم شامل نیروی درگ هوا

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A V^2 \quad (22-3)$$

، نیروی ناشی از شب جاده

$$F_g = M_{eff} g \sin i \quad (23-3)$$

و نیروی مقاومت غلتی

$$F_r = M_{eff} g f_r \quad (24-3)$$

محاسبه و بر سر چرخ‌ها اعمال شده‌اند. در روابط فوق، C_d ضریب درگ هوا، ρ_{air} چگالی هوا، A سطح تماس اتوبوس، V سرعت اتوبوس، θ زاویه‌ی شب جاده و f_r ضریب مقاومت غلتی تایر اتوبوس می‌باشدند. درنهایت از تقسیم اختلاف نیروی جلوبرنده و مقاوم بر جرم مؤثر اتوبوس ، شتاب اتوبوس و با انتگرال‌گیری از شتاب، سرعت اتوبوس به‌دست آمده که به‌صورت پسخور منفی به مدل راننده ارجاع داده شده‌است. مدل دینامیک خودرو در ضمیمه نشان داده شده‌است.

۱۱-۳ تأیید صحت مدل‌سازی

هر مدل کامپیوتری نیازمند یک مرحله‌ی تأیید صحت^{۱۴} می‌باشد. نحوه‌ی صحیح و کامل تأیید یک مدل، مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های مدل با آزمایش‌های عملی انجام شده روی مدل واقعی است. در این پایان‌نامه، دسترسی به اتوبوس هیبرید هیدرولیک و ادوات اصلی آن مانند موتور احتراق داخلی، پمپ-موتور هیدرولیکی

^{۱۴} Validation

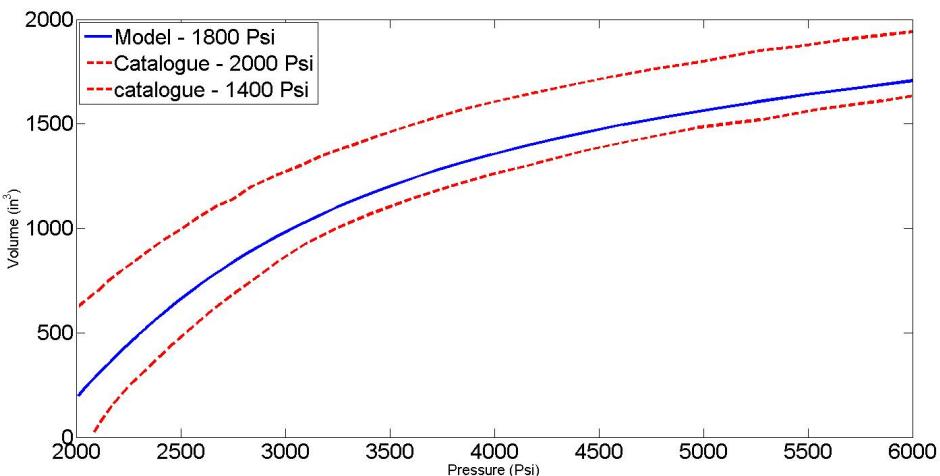
۱۱-۳ تأیید صحت مدل‌سازی

و آکومولاتورها وجود ندارد. همچنین، تهیه‌ی این ادوات و آماده‌سازی سیستم تست آنها یک فرآیند پرهزینه از لحاظ زمان و مسائل مالی می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های موجود، نحوه‌ی تأیید صحت فرآیند مدل‌سازی در این پایان‌نامه، قدری متفاوت است.

در مدل‌سازی ارائه شده در این پایان‌نامه، تمامی اطلاعات از کاتالوگ‌های ادوات مختلف سیستم استخراج و استفاده شده است. به منظور تأیید صحت مدل‌سازی نیز تنها اطلاعات کاتالوگی ادوات در دسترس است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌هایی که به منظور تأیید صحت مدل‌های آکومولاتور، پمپ- موتور هیدرولیکی و مجموعه‌ی گیربکس- موتور احتراق داخلی انجام شده، ارائه شده است.

۱۱-۱ تأیید مدل آکومولاتور

بدین منظور، مقادیر حجم سیال داخل آکومولاتور به عنوان سیگنال ورودی به مدل آکومولاتور داده شده است. خروجی مدل، مقدار فشار آکومولاتور متناظر با هر مقدار سیال ذخیره شده است. نمودار فشار بر حسب حجم سیال که از این شبیه‌سازی بدست آمده، قابل مقایسه با نمودارهای موجود در کاتالوگ آکومولاتور است. این مقایسه در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمودار حاصل از مدل، متناظر با فشار اولیه‌ی ۱۸۰۰ Psi، بین نمودارهای کاتالوگ مربوط به فشارهای اولیه‌ی ۲۰۰۰ و ۱۴۰۰ Psi قرار دارد. همچنین شکل کلی نمودارها حفظ شده است.

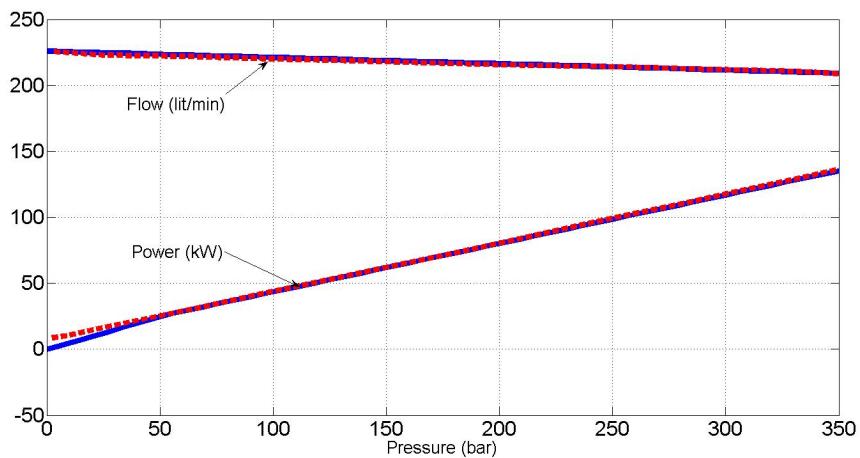


شکل ۱۵-۳: نمودار تأیید صحت مدل آکومولاتور

۱۱-۲ تأیید مدل پمپ- موتور هیدرولیکی

در مورد پمپ- موتور هیدرولیکی، مقادیر دبی خروجی و گشتاور مصرفی در حالت عملکرد پمپی به عنوان ابزار تأیید صحت مدل استفاده شده است. با اعمال بیشینه‌ی مقدار جابجایی پمپ- موتور و همچنین اعمال

سرعت دورانی ثابت، مقادیر پارامترهای مذکور در فشارهای مختلف طی یک شبیه‌سازی تعیین شده است. این مقادیر با نمودارهای ارائه شده در کاتالوگ پمپ-موتور برای سرعت دورانی ۱۸۰۰ دوربر دقیقه، مقایسه شده است. این نمودار در شکل ۱۶-۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نمودارهای حاصل از مدل به نمودارهای موجود در کاتالوگ بسیار نزدیک هستند.



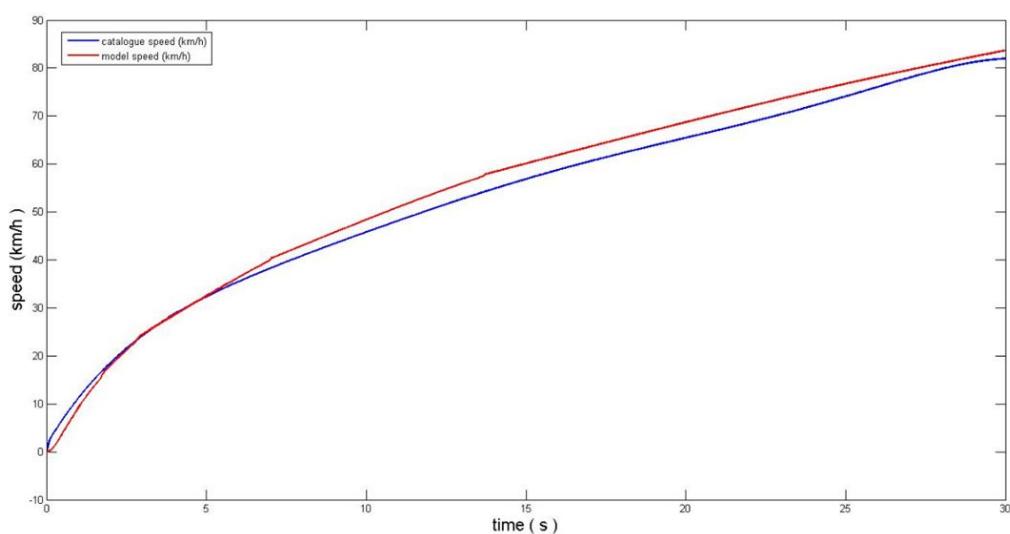
شکل ۱۶-۳: نمودار تأیید صحت مدل پمپ-موتور در سرعت ۱۸۰۰ rpm

۱۱-۳ تأیید مدل گیربکس و موتور احتراق داخلی

جهت تأیید صحت مدل‌های موتور احتراق داخلی و گیربکس اتوماتیک، نتایج مربوط به یک شتاب‌گیری اتوبوس متعارف (سیستم انتقال قدرت بدون پمپ-موتور هیدرولیکی و آکومولاتور) با نمودارهای موجود در کاتالوگ گیربکس مقایسه شده است. شکل ۱۷-۳ نتیجه‌ی این صحنه‌گذاری را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که دو نمودار به یکدیگر نزدیک هستند. مقدار خطای متوسط این دو نمودار برابر ۴/۱۹ درصد است.

۱۲-۳ سایزینگ آکومولاتور

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، سایزینگ آکومولاتور نیازمند انجام شبیه‌سازی‌ها و بدنبال آن تعیین مقدار انرژی قابل بازیابی در طول یک سیکل رانندگی می‌باشد. منظور از سایزینگ آکومولاتور، تعیین ظرفیت و تعداد بهینه آن است. برای سایزینگ آکومولاتور با یک محدوده مشخص از ظرفیت و تعداد آکومولاتورها روبرو هستیم. در مورد انتخاب ظرفیت مناسب برای آکومولاتورها، با یک جستجو در میان محصولات شرکت بوش-رکسروت (به عنوان شرکت تأمین‌کننده دردسترس)، محدوده ظرفیت مشخص می‌شود. انتخاب‌های ممکن برای ظرفیت آکومولاتورها در جدول ۴-۳ ارائه شده است. بیشینه‌ی فشار تمامی



شکل ۱۷-۳: نمودار تأیید صحت مدل گیربکس و موتور احتراق داخلی

جدول ۳-۴: انتخاب‌های ممکن برای ظرفیت آکومولاتورهای مجموعه

| ظرفیت نامی آکومولاتور (gal) | ظرفیت واقعی آکومولاتور (lit) | وزن (kg) | طول و قطر (mm) |
|-----------------------------|------------------------------|----------|----------------|
| ۵ | ۲/۷ | ۱۰۰ | ۹۱۴ و ۲۴۳ |
| ۱۰ | ۱۳/۶ | ۱۵۲ | ۱۴۴۱ و ۲۴۳ |
| ۱۵ | ۲۰ | ۲۲۰ | ۲۰۳۸ و ۲۴۳ |

این آکومولاتورها ۳۴۵ bar است. در مورد تعداد آکومولاتورها، محدودیت جانمایی و افزایش وزن اتوبوس وجود دارد. به عنوان یک محدوده معقول و البته کامل، تعداد ۴ تا ۱۵ آکومولاتور از نوع ۵ گالنی انتخاب می‌شود. برای تعیین این محدوده، سیستم‌های هیبرید هیدرولیک که تابه‌حال ساخته شده‌اند نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است.

عملیات طراحی به منظور سایزینگ آکومولاتور در سه مرحله انجام شده است:

- تعیین حجم سیال بهینه (تعداد آکومولاتورها). با ثابت نگهداشت حجم آکومولاتور (۵ گالن)، تعداد آکومولاتورها را در محدوده موردنظر تغییر می‌دهیم و براساس معیارهای طراحی، گزینه‌ی بهینه تعیین می‌شود.
- تعیین حجم آکومولاتور بهینه. پس از مشخص شدن حجم سیال بهینه موردنیاز، گزینه‌های موجود از ۳ حجم آکومولاتور ذکر شده در جدول ۳-۴ که حجم سیال موردنظر را تأمین می‌کنند، مشخص می‌شوند. سپس براساس معیارهای طراحی، از میان گزینه‌های موجود بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

- ملاحظات طراحی. در پایان ملاحظات طراحی نیز مدنظر قرار می‌گیرند. این ملاحظات براساس شرایط کاری سیستم تدوین شده‌اند.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود برای سایزینگ آکومولاتور یک سری معیار طراحی لحاظ شده‌اند. این معیارها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود :

- مصرف سوخت اتوبوس. مصرف سوخت اتوبوس در ده سیکل حرکتی نورمبورگ محاسبه و درنظر گرفته شده است.

- قابلیت شتاب‌گیری اتوبوس. شتاب‌گیری اتوبوس در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه محاسبه و درنظر گرفته شده است.

- قابلیت شبیه‌سیمایی اتوبوس. مقدار سرعت ثابتی که اتوبوس در هریک از شبیه‌های ۴، ۷، ۱۰ و ۱۴ درصد می‌تواند مسیر را طی کند، محاسبه و درنظر گرفته شده است.

در ادامه، هریک از سه مرحله‌ی سایزینگ و همچنین مقادیر معیارهای طراحی برای هریک از انتخاب‌های سایزینگ ارائه شده است.

۱۲-۳ تعیین حجم سیال بهینه‌ی موردنیاز

همان‌طورکه اشاره شد، با فرض آکومولاتور با ظرفیت ۵ گالن، معیارهای طراحی برای تعداد آکومولاتورهای ۴ تا ۱۵ عدد مقایسه شده است. با افزایش تعداد آکومولاتورهای سیستم، ظرفیت انرژی مجموعه بالا می‌رود. در مقابل، این مورد افزایش وزن خودرو را نیز موجب می‌شود. از این‌رو باستی گزینه‌ای که از هر لحظه مناسب است، انتخاب گردد. نتایج مقایسه معیارهای طراحی در جداول ۷-۳ تا ۵-۳ نشان داده شده است. برای تمامی حالات، سطح شارژ اولیه برابر با ۸۰ درصد می‌باشد.

براساس نتایج ارائه شده در جداول فوق، موارد زیر استنبط می‌شوند:

- مصرف سوخت اتوبوس هیدرولیک نسبت به اتوبوس متعارف، برای تمامی گزینه‌های موجود آکومولاتور بین ۲۰ تا ۲۶ درصد کاهش یافته است.

- قابلیت شتاب‌گیری اتوبوس هیدرولیک برای تمام گزینه‌های موجود آکومولاتور، در مجموع ۱۰ ثانیه، بهتر از اتوبوس متعارف است. همچنین میان گزینه‌های مختلف سایزینگ آکومولاتور، تفاوت ناچیزی در قابلیت شتاب‌گیری وجود دارد. این تفاوت به‌این صورت است که با تعداد بیشتری آکومولاتور، قابلیت شتاب‌گیری بهتری حاصل می‌شود.

- قابلیت شبیه‌سیمایی اتوبوس هیدرولیک برای تمام گزینه‌های موجود آکومولاتور، نسبت به اتوبوس متعارف کمتر است. البته همچنان میان گزینه‌های مختلف سایزینگ آکومولاتور، تفاوت محسوسی در قابلیت شبیه‌سیمایی مشاهده نمی‌شود. این تفاوت به‌این صورت است که با تعداد کمتری آکومولاتور، قابلیت شبیه‌سیمایی بهتری بدست می‌آید.

جدول ۳-۵: مقایسه مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن

| تعداد آکومولاتور | صرف سوخت (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر) | درصد کاهش مصرف سوخت |
|------------------|--------------------------------|---------------------|
| ۴ | ۵۳/۸ | ۲۳/۸ |
| ۵ | ۵۳/۰ | ۲۴/۹ |
| ۶ | ۵۲/۲ | ۲۶/۰ |
| ۷ | ۵۲/۸ | ۲۵/۲ |
| ۸ | ۵۳/۹ | ۲۳/۷ |
| ۹ | ۵۴/۲ | ۲۳/۳ |
| ۱۰ | ۵۵/۰ | ۲۲/۱ |
| ۱۱ | ۵۵/۴ | ۲۱/۵ |
| ۱۲ | ۵۵/۲ | ۲۱/۶ |
| ۱۳ | ۵۴/۸ | ۲۲/۴ |
| ۱۴ | ۵۵/۴ | ۲۱/۵ |
| ۱۵ | ۵۵/۱ | ۲۱/۷ |

جدول ۳-۶: مقایسه شتاب گیری در اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن

| سرعت بعد از (km/h) ۱۰۰ | سرعت بعد از (km/h) ۵۰ | سرعت بعد از (km/h) ۲۰ | سرعت بعد از (km/h) ۱۰ | تعداد آکومولاتور |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| ۱۱۲/۵ | ۱۰۱/۳ | ۶۶/۷۸ | ۴۶/۶ | ۴ |
| ۱۱۲/۵ | ۱۰۱/۵ | ۶۶/۴۰ | ۴۶/۶۴ | ۵ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۱/۸ | ۶۸/۱۲ | ۴۶/۶۵ | ۶ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۲/۱ | ۶۸/۸۹ | ۴۶/۶۵ | ۷ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۲/۴ | ۶۹/۶۲ | ۴۶/۶۶ | ۸ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۲/۷ | ۷۰/۳ | ۴۶/۶۲ | ۹ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۲/۹ | ۷۱/۰ | ۴۶/۶۱ | ۱۰ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۳/۲ | ۷۱/۷ | ۴۶/۶۰ | ۱۱ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۳/۵ | ۷۲/۴ | ۴۶/۵۹ | ۱۲ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۳/۷ | ۷۳/۱ | ۴۶/۵۸ | ۱۳ |
| ۱۱۲/۴ | ۱۰۴/۱ | ۷۳/۲ | ۴۶/۵۴ | ۱۴ |
| ۱۱۲/۳ | ۱۰۴/۶ | ۷۳/۲ | ۴۶/۵۳ | ۱۵ |
| ۱۰۲/۷ | ۹۷/۷ | ۶۸/۹ | ۴۸/۰ | اتوبوس متعارف |

جدول ۳-۷: مقایسه شیب‌پیمایی در اتوبوس هیبرید و متعارف برای تعداد آکومولاتورهای مختلف با حجم نامی ۵ گالن

| سرعت ثابت در شیب ۱۴ درصد (km/h) | سرعت ثابت در شیب ۱۰ درصد (km/h) | سرعت ثابت در شیب ۷ درصد (km/h) | سرعت ثابت در شیب ۴ درصد (km/h) | تعداد آکوملاتور |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| ۱۹/۲ | ۳۹/۲ | ۵۱/۵ | ۷۸ | ۴ |
| ۱۹/۲ | ۳۸/۹ | ۵۱/۱ | ۷۷ | ۵ |
| ۱۹/۱ | ۳۸/۷ | ۵۰/۷ | ۷۶/۵ | ۶ |
| ۱۸/۹ | ۳۸/۵ | ۵۰/۳ | ۷۶/۰ | ۷ |
| ۱۸/۹ | ۳۸/۴ | ۴۹/۹ | ۷۵/۵ | ۸ |
| ۱۸/۸ | ۳۸/۳ | ۴۹/۵ | ۷۵/۰ | ۹ |
| ۱۸/۸ | ۳۸/۰ | ۴۸/۹ | ۷۴/۵ | ۱۰ |
| ۱۸/۷ | ۳۷/۶ | ۴۸/۲ | ۷۴/۲ | ۱۱ |
| ۱۸/۷ | ۳۷/۳ | ۴۷/۵ | ۷۳/۸ | ۱۲ |
| ۱۸/۶ | ۳۷/۰ | ۴۶/۸ | ۷۳/۴ | ۱۳ |
| ۱۸/۶ | ۳۶/۷ | ۴۶/۰ | ۷۳/۰ | ۱۴ |
| ۱۸/۵ | ۳۶/۵ | ۴۵/۴ | ۷۲/۵ | ۱۵ |
| ۲۵/۱ | ۴۰/۰ | ۵۵/۳ | ۹۴/۶ | اتوبوس متعارف |

جدول ۳-۸: مقایسه حجم سیال موردنیاز در گزینه‌های مختلف

| چیدمان آکومولاتورها | حجم سیال در دسترس (lit) | وزن مجموعه آکومولاتور (بر ۱۰۰ کیلومتر) | صرف سوخت اتوبوس (lit) |
|----------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| ۴ عدد آکومولاتور ۵ گالانی | ۲۸/۸ | ۴۰۰ | ۵۳/۸ |
| ۵ عدد آکومولاتور ۵ گالانی | ۳۶/۰ | ۵۰۰ | ۵۳/۰ |
| ۶ عدد آکومولاتور ۵ گالانی | ۴۳/۲ | ۶۰۰ | ۵۲/۵ |
| ۲ عدد آکومولاتور ۱۰ گالانی | ۲۷/۲ | ۳۰۴ | ۵۳/۷ |
| ۳ عدد آکومولاتور ۱۰ گالانی | ۴۰/۸ | ۴۵۶ | ۵۲/۳ |
| ۲ عدد آکومولاتور ۱۵ گالانی | ۴۰ | ۴۴۰ | ۵۲/۲ |

با درنظر گرفتن جمیع مطالب گفته شده، انتخاب نهایی میان ۴ ، ۵ و ۶ عدد آکومولاتور صورت می‌گیرد. با توجه به قابلیت شب‌پیمایی و شتاب‌گیری یکسان اتوبوس با استفاده از این سه گزینه، عامل اصلی در انتخاب نهایی، میزان کاهش مصرف سوخت است. برای تعیین مناسب‌ترین تعداد آکومولاتور بین این سه گزینه، باید ظرفیت‌های نامی دیگر آکومولاتور نیز درنظر گرفته شود. به عبارت دیگر، با استی تعداد آکومولاتورها با ظرفیت نامی متفاوت که حجم سیال معادل با حجم متناظر با موارد انتخاب شده در این مرحله را تأمین می‌نمایند، مشخص شوند.

۱۲-۳ تعیین ظرفیت نامی مناسب برای آکومولاتور

با درنظر گرفتن تعداد ۴ ، ۵ و ۶ آکومولاتور با ظرفیت ۵ گالان، تعداد آکومولاتورهای با ظرفیت متفاوت متناظر با این حجم سیال قابل محاسبه است. با توجه به نتایج بخش قبل، مهمترین عامل در مقایسه گزینه‌های موجود میزان کاهش مصرف سوخت است. در جدول ۸-۳ مقادیر مصرف سوخت هر گزینه به همراه سیال در دسترس و وزن مجموعه ارائه شده است. برای انتخاب نهایی از میان موارد موجود در جدول ۸-۳، با استی نکات زیر را درنظر داشت:

- برای استفاده از آکومولاتورها در مدار قدرت یک پمپ- موتور، همواره باید سطح فشار همگنی یکسان باشد. این موضوع در هیبریدهای الکتریکی نیز در مورد سطح ولتاژ باتری‌ها صادق است. بدیهی است که هم فشار نگهداشت تعداد کمتری آکومولاتور نسبت به تعداد زیاد آن، آسان‌تر است.
- در مدل‌سازی سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازنی، تمامی رفتارهای فیزیکی شناخته شده اجزای سیستم مدل شده است. حال آنکه در عمل، احتمال بروز رفتارهای مدل‌نشده از هریک از اجزاء سیستم وجود دارد. در مورد اجزای سیستم هیدرولیکی این رفتارهای شناسایی نشده با نشستی

سیال و کاهش بازده کلی سیستم همراه است. از این رو استفاده از آکومولاتور با حجم سیال در دسترس بیشتر، توصیه می شود.

- افزایش تعداد و سایز (ابعاد) آکومولاتور متناظر با افزایش هزینه خرید آن است. بنابراین گزینه‌ای انتخاب می شود که تعداد کمتر و سایز کوچکتری داشته باشد.
- به عنوان یک امر بدیهی، گزینه‌ای انتخاب می شود که با وزن کمتر، حجم سیال در دسترس بیشتری را فراهم کند.

درنهایت با توجه به تمامی نکات ذکر شده، تعداد ۲ آکومولاتور با ظرفیت ۱۵ گالن انتخاب شده است. این مورد با کمترین وزن، بیشترین حجم سیال در دسترس را داراست و کمترین مصرف سوخت را دارد. گزینه‌ی ۳ آکومولاتور با ظرفیت ۱۰ گالن نیز شرایط مشابهی دارد. البته تعداد زوج آکومولاتورها جانمایی مطلوب‌تر و آسان‌تری را بدنبال خواهد داشت.

فصل ۴

طراحی استراتژی کنترل هوشمند

در این فصل نحوه‌ی طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی بیان شده است. همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، رویکرد استفاده شده در استراتژی کنترل هوشمند به این صورت است که هر قسمت از یک سیکل رانندگی دلخواه درجه‌ی عضویتی در چهار خوش دارد. این چهار خوش معروف چهار سیکل استاندارد هستند که برای هریک از آنها یک استراتژی کنترل با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ایجاد شده است. خروجی نهایی برای سیکل موردنظر برابر با ترکیب خطی حاصلضرب‌های درجه‌ی عضویت در هر خوش و خروجی بهینه‌ی متناظر می‌باشد. برای پیاده‌سازی ایده‌ی فوق، بایستی یک مدل متناظر با خروجی استراتژی کنترل بهینه برای هر خوش‌های استاندارد ایجاد شود. در اینجا از شبکه‌های عصبی^۱ به عنوان مدل موردنظر استفاده شده است. همچنین از ترکیب یک الگوریتم انتخاب مشخصه و یک الگوریتم خوش‌بندی فازی به منظور تعیین درجه‌ی عضویت هر سیکل دلخواه در چهار خوش‌های استاندارد استفاده شده است.

در ادامه، ابتدا نحوه‌ی عملکرد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی به همراه جزئیات آن ارائه شده است. سپس چگونگی مدل‌سازی خروجی‌های استراتژی کنترل‌های بدست‌آمده توسط مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی بیان شده است. همچنین الگوریتم‌های انتخاب ویژگی و خوش‌بندی فازی استفاده شده بطور مفصل توضیح داده شده‌اند. در طول فصل، به منظور تأیید عملکرد هر قسمت از استراتژی کنترل هوشمند، نتایجی ارائه شده است. نحوه‌ی تأیید عملکرد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی و مجموعه‌ی شبکه‌های عصبی با استفاده از شبیه‌سازی مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی انجام گرفته است. در مقابل، عملکرد الگوریتم‌های انتخاب ویژگی و خوش‌بندی فازی با استفاده از بررسی کیفیت خوش‌بندی برای ۱۳ سیکل نمونه‌ی دلخواه، ارزیابی شده است.

¹ Neural Networks

۱-۲ طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

دینامیکی

همان‌طور که بیان شد، در این پایان‌نامه برای تعیین استراتژی کنترل بهینه در چهار سیکل رانندگی استاندارد از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده است. در ادامه ماهیت الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی به همراه مشخصات الگوریتم استفاده شده در این پایان‌نامه ارائه شده است. همچنین چهار سیکل رانندگی استاندارد که الگوریتم مورد نظر روی آنها اجرا شده است، معرفی شده‌اند.

۱-۱-۱ الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی چیست؟

الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یک روش بازگشتی برای حل بهینه‌ی مسائل تصمیم‌گیری ترتیبی^۲ است [۳۶]. در این الگوریتم، مسئله موردنظر به تعدادی زیرمسئله تقسیم و سپس تصمیم بهینه در هریک از زیرمسئله‌ها تعیین می‌گردد. ارتباط بین زیرمسئله‌ها، مسیر بهینه‌ی تصمیم‌گیری را در طول زمان انجام مسئله اصلی مشخص می‌کند. این ترفند، از جستجوی جامع^۳ مسیرهای موجود برای دستیابی به مسیر بهینه که نیازمند صرف زمان طولانی است، جلوگیری می‌نماید. مسیر بهینه‌ی بدست آمده، خروجی نهایی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی است. الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی اولین بار در سال ۱۹۵۷ توسط بلمن^۴ ارائه شد. بلمن با استفاده از قوانین موجود در حوزه‌ی کنترل بهینه، بهینگی الگوریتم ارائه شده را اثبات نمود [۳۷]. او برنامه‌ریزی دینامیکی را به صورت یک تئوری به نام اصل بهینگی^۵ ارائه کرده است. طبق اصل بهینگی [۳۸] :

یک مسیر بهینه دارای این مشخصه است که بدون توجه به حالت و تصمیم نقطه‌ی آغازین، تصمیمات اتخاذ شده از هر نقطه‌ای در مسیر تا انتهای، یک مسیر بهینه را تشکیل می‌دهد. این مورد مشروط به آن است که تصمیمات گرفته شده در نقاط قبل با شروع از نقطه‌ی آغاز منجر به رسیدن به نقطه‌ی موردنظر شده باشد.

به منظور مشاهده چگونگی کاربرد اصل بهینگی بلمن در مسائل، یک سیستم دینامیکی را که با استفاده از معادلات دیفرانسیل به صورت زیر بیان شده است در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \tag{۱-۴}$$

که در آن $x(t)$ بردار حالت سیستم و $u(t)$ بردار کنترل می‌باشد. طبق روند معمول یک مسئله‌ی کنترل بهینه، بایستی یک سیگنال کنترل که عضو محدوده‌ی مجاز است را طوری تعیین نمود که یک تابع هزینه‌ی اسکالار به صورت

$$R(u(t), t_f) = \phi(x(t_f)) + \int_0^{t_f} J(x(t), u(t)) dt \tag{۲-۴}$$

^۲ Sequential Decision Problems

^۳ Exhaustive Search

^۴ R. Bellman

^۵ Principle of Optimality

۱-۴ طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

کمینه شود. صورت مسأله برای یک سیستم گسته به صورت روابط

$$x_{n+1} - x_n = h(x_n, u_n, n\delta t) \quad (3-4)$$

$$R(u_n, N) = \phi x_n + \sum_{n=1}^{N-1} J(x_n, u_n) \delta t \quad (4-4)$$

که N بیانگر تعداد گام‌های زمانی است، بیان می‌شود. استفاده از اصل بهینگی بلمن برای مسأله گسته، منجر به رابطه‌ی بازگشتی [۳۶]

$$\begin{aligned} F_{N-n}(x_n) &= \min_{u_n} (J(x_n, u_n) \delta t + F_{N-(n+1)}(x_{n+1})) \\ F_{\circ}(x_N) &= \phi(x_N, N) \end{aligned} \quad (5-4)$$

می‌شود که در آن (x_n) F_{N-n} برابر با مقدار تجمعی تابع هزینه‌ی ارائه شده در رابطه‌ی (۴-۴) در صورت استفاده از مسیر بهینه از گام n تا گام انتهایی است. به عبارت دیگر تصمیم بهینه در هر گام طوری انتخاب می‌شود که تابع هزینه‌ی تجمعی برای مسیر از گام n تا انتهایی مسیر کمترین مقدار خود را داشته باشد. حل مسأله‌ی بهینه از گام انتهایی مسیر شروع شده و به گام آغازین ختم می‌شود. این الگوریتم، با نام برنامه‌ریزی دینامیکی رویه‌عقب^۹ شناخته می‌شود. ملاحظه می‌شود که مقدار تابع هزینه در گام نهایی برای آغاز الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی رویه‌عقب نیاز است.

علاوه بر الگوریتم فوق، روند دیگری نیز برای کاربرد عملی برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده است. دریفوس^{۱۰} در سال ۱۹۶۵ برنامه‌ریزی دینامیکی رویه‌جلو^{۱۱} را پیشنهاد داد [۳۹]. در این الگوریتم، حالت اولیه مسأله و مقدار تابع هزینه‌ی آن مشخص هستند و بهینه‌سازی به صورت رویه‌جلو از گام اول شروع و به گام انتهایی ختم می‌شود. رابطه‌ی بازگشتی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی رویه‌جلو به صورت [۳۶]

$$\begin{aligned} H_n(x_n) &= \min_{u_{n-1}} (J(x_{n-1}, u_{n-1}) \delta t + H_{n-1}(x_{n-1})) \\ H_{\circ}(x_{\circ}) &= 0 \end{aligned} \quad (6-4)$$

بیان می‌شود. که در آن (x_n) H_n برابر با مقدار تجمعی تابع هزینه در صورت استفاده از مسیر بهینه از گام آغازین تا گام n است. ملاحظه می‌شود که در این حالت، به مقدار تابع هزینه در گام انتهایی مسیر نیازی نمی‌باشد. این مورد برتری الگوریتم رویه‌جلو نسبت به الگوریتم رویه‌عقب است.

۲-۱-۴ کلیات الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده در این پایان‌نامه

طراحی استراتژی کنترل بهینه برای یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید، یک مسأله‌ی دینامیکی است. هدف مسأله، طراحی سیگنال‌های مناسب به عنوان گشتاور موتور احتراق داخلی و پمپ-موتور هیدرولیکی به منظور دستیابی به مسیر بهینه‌ی مقدار سطح شارژ آکومولاتورها می‌باشد. در اینجا برای تعیین استراتژی کنترل بهینه متناظر با چهار سیکل رانندگی استاندارد از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی رویه‌جلو استفاده

^۹ Backward Dynamic Programming

^{۱۰} Dreyfus

^{۱۱} Forward Dynamic Programming

شده است. متغیر حالت مسأله، مقدار سطح شارژ آکومولاتورهای مجموعه در طول زمان سیکل رانندگی است. مقدار متغیر حالت در گام‌های آغاز و پایان ثابت و برابر درنظر گرفته شده است. برابری مقدار سطح شارژ آکومولاتورها در ابتدا و انتهای مسیر، نیاز به محاسبه‌ی مقدار انرژی مصرف شده در آکومولاتورها در طول مسیر و اضافه نمودن آن به مقدار مصرف سوخت موتور احتراق داخلی بهمنظور تعیین مقدار مصرف سوخت واقعی خودروی هیبرید را از بین می‌برد. همچنین متغیرهای کنترلی، مقادیر گشتاور موتور احتراق داخلی و گشتاور پمپ-موتور هیدرولیکی در طول زمان سیکل رانندگی هستند. مقدار مصرف سوخت موتور احتراق داخلی در کل زمان سیکل رانندگی به عنوان تابع هزینه‌ی مسأله درنظر گرفته شده است:

$$R_n = \sum_{n=1}^N m_f \quad (7-4)$$

برای پیاده‌سازی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، سه سیگنال به عنوان متغیرهای ورودی درنظر گرفته شده‌اند:

- سیگنال سرعت اتوبوس. متناسب با هر سیکل رانندگی، سیگنال سرعت مورد نظر استفاده شده است. توجه شود که با توجه به ماهیت روبه‌جلوی مدل اتوبوس، خطای میان سرعت خودرو و سرعت اتوبوس وجود دارد. در اینجا از این مقدار خطا صرف‌نظر شده و از سیگنال سرعت سیکل به عنوان سرعت اتوبوس به عنوان ورودی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده است.
- سیگنال گشتاور مطلوب راننده. این مورد شامل گشتاور مطلوب راننده در هر دو شرایط ترمزگیری و شتاب‌گیری اتوبوس می‌باشد. با توجه به ماهیت روبه‌جلوی مدل اتوبوس، مقدار سیگنال گشتاور مطلوب راننده در یکبار شبهه‌سازی مدل اتوبوس با استفاده از یک استراتژی کنترل قانون‌مند دخیره شده و به عنوان ورودی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده است.
- سیگنال ضربه‌دنده‌ی گیریکس اتوماتیک اتوبوس. با توجه به اینکه الگوریتم تعویض دنده در مدل گیریکس اتوماتیک تنها تابعی از سرعت اتوبوس است، بنابراین با مشخص بودن سیکل رانندگی، این سیگنال نیز ثابت است.

سه متغیر ورودی بالا، جهت تعیین قیود مسأله‌ی بهینه‌سازی استفاده شده‌اند. قیود موجود تعیین می‌نمایند که محدوده‌ی مجاز برای انتخاب سیگنال‌های کنترلی در هرگام زمانی چیست. قیود مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی عبارتند از:

- گشتاور موتور احتراق داخلی که بین صفر تا ۱۱۰۰ نیوتون‌متر می‌باشد.
- جابجایی پمپ-موتور هیدرولیکی که بین ۱۲۵ - تا ۱۲۵ + سانتی‌متر مکعب در دور می‌باشد.
- مقدار سطح شارژ آکومولاتور که بین ۹/۰ تا ۲/۰ درنظر گرفته شده است. این محدوده بهمنظور رعایت ایمنی آکومولاتورها لحاظ شده است.

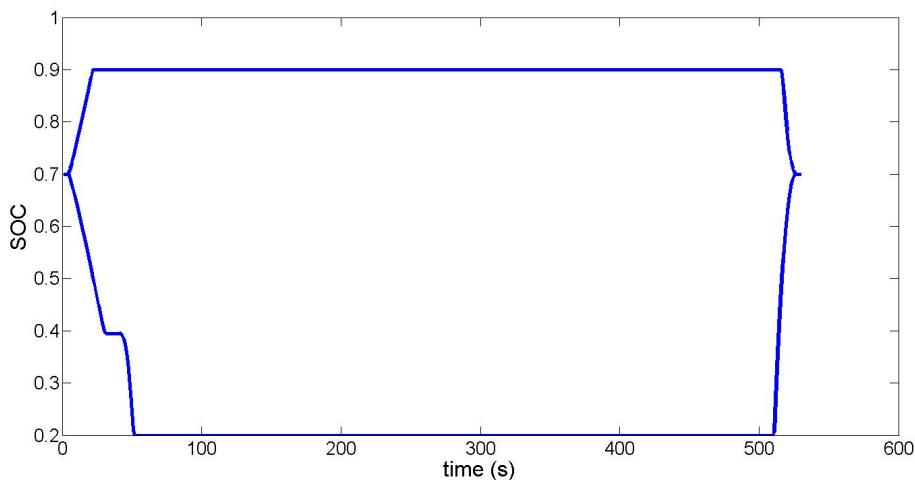
همان‌طورکه بیان شد، در اینجا از روند روبه‌جلو برای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده است. در صورت استفاده از روند روبه‌عقب، در هرگام از الگوریتم بهینه‌سازی احتمال انتخاب حالتی از سیستم که

امکان دستیابی از حالات قبل به آن نیست (باتوجه به قیود سیستم)، وجود دارد. این مشکل در الگوریتم روبه‌جلو وجود ندارد. زیرا مسیر بهینه به صورت روبه‌جلو و با رعایت قیود سیستم از همان ابتدا تعیین می‌گردد.

۳-۱-۴ جزئیات کد نوشته شده برای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

به منظور استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو، یک کد در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است. این کد شامل سه قسمت اصلی است.

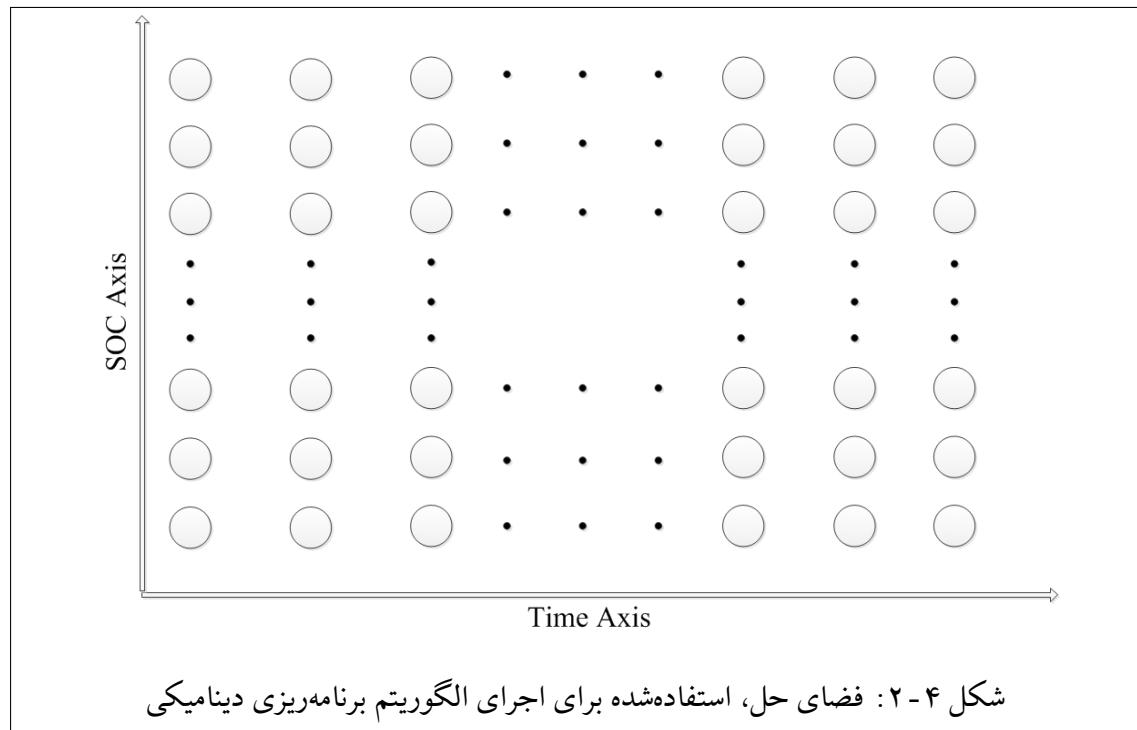
ابتدا با درنظر گرفتن بیشینه‌ی جابجایی مثبت و منفی پمپ-موتور (۱۲۵ سانتی‌مترمکعب بر دور) و همچنین مقدار SOC اولیه که برابر ۷/۰ است، مرز بالا و پایین برای متغیر حالت در طول مسیر تعیین می‌گردد. بدیهی است که مرزها محدود به مقادیر بیشینه و کمینه‌ای که به عنوان قید مسئله درنظر گرفته شده‌اند، می‌شوند. نمونه‌ای از نتیجه‌ی این قسمت برای یکی از سیکل‌های استاندارد در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. تعیین



شکل ۱-۴: مرزهای بالا و پایین برای متغیر حالت (SOC) در طول زمان یک سیکل رانندگی

مرزهای بالا و پایین متغیر حالت در طول زمان سیکل رانندگی، جهت شبکه‌بندی فضای حل لازم است. منظور از فضای حل، یک فضای دو بعدی است که محور افقی آن زمان و محور قائم آن SOC می‌باشد (شکل ۲-۴). برای تعیین تصمیم بهینه در هر گام زمانی و بدنال آن تعیین مسیر بهینه برای متغیر حالت، بایستی فضای حل را با استفاده از تعدادی گره گسسته‌سازی^۹ نمائیم. با این‌کار، انتخاب تصمیم بهینه در هر گام را محدود به گره‌های موجود در گام قبلی می‌نماییم. به منظور گسسته‌سازی فضای حل، علاوه‌بر مرزهای بالا و پایین SOC، به طول گام در طول دو محور زمان و SOC نیز نیازمندیم. هرچه طول گام‌ها کمتر باشد، فضای حل به فضای پیوسته نزدیک‌تر می‌شود که افزایش تعداد گزینه‌ها برای انتخاب تصمیم بهینه را به همراه دارد. افزایش تعداد گزینه‌ها منجر به تعیین یک مسیر بهینه‌تر می‌گردد. از طرف دیگر، کاهش طول گام‌ها، افزایش پیچیدگی محاسباتی حل را به همراه خواهد داشت. برای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یک کامپیوتر با چهار پردازنده و ۸ گیگابایت حافظه‌ی کوتاه مدت در اختیار بوده است. کاهش طول گام‌ها محدود به

^۹Discretization



قدرت پردازش این کامپیوتر می‌شود. درنهایت طول گام ۱ ثانیه برای متغیر زمان و طول گام ۰/۰۰۱ برای SOC درنظر گرفته شده است.

در قسمت دوم از کد مربوطه، مقدار مصرف سوخت تجمیعی موتور احتراق داخلی متاظر با تمامی تصمیم‌های مجاز برای هر گره در هر گام زمانی تعیین شده است. در این قسمت، ابتدا با استفاده از معادلات استفاده شده در مدل‌سازی پمپ-موتور هیدرولیکی (فصل ۳) و با توجه به مقدار جابجایی بیشینه‌ی پمپ-موتور، تمامی گزینه‌های مجاز برای تصمیم‌گیری مشخص می‌گردد. توجه شود که منظور از تصمیم‌گیری، انتخاب گرهی مبدأ در گام قبلی برای حرکت به سمت هر گره در گام حاضر می‌باشد. هریک از گزینه‌های موجود متاظر با یک گشتاور مشخص برای پمپ-موتور هیدرولیکی است. سپس با درنظر گرفتن حالت شتاب‌گیری یا ترمز‌گیری اتویوس، مقدار گشتاور موتور احتراق داخلی از رابطه‌ی

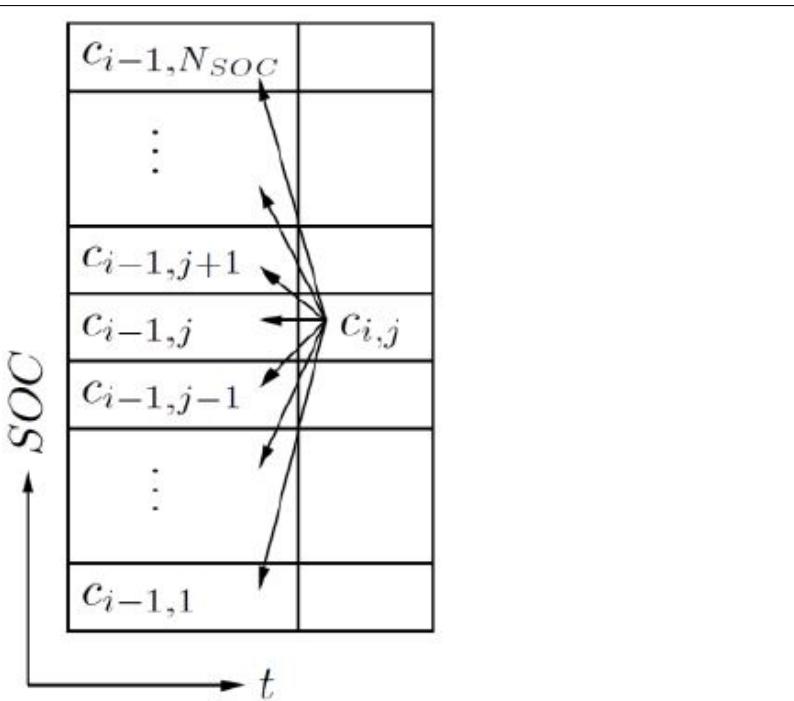
$$T_{eng} = T_{dem} - T_{pm}, \quad T_{dem} > 0 \quad (8-4)$$

$$T_{eng} = 0, \quad T_{dem} \leq 0$$

بدست می‌آید. مقدار گشتاور موتور احتراق داخلی نیز محدود به قید مربوطه که در بخش قبل به آن اشاره شد، می‌باشد. با داشتن مقدار گشتاور موتور احتراق داخلی برای هر گزینه، می‌توان مقدار مصرف سوخت موتور را بدست آورد. بدین منظور یکتابع برای مدل‌سازی نمودار مصرف سوخت موتور احتراق داخلی (فصل ۳) در کد مربوط به الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ایجاد شده است. مقدار تابع هزینه متاظر با هر گزینه از جمع مصرف سوخت موتور در گام حاضر با مقدار مصرف سوخت تجمیعی موتور در حالات قبل بدست می‌آید (رابطه‌ی (۴-۵)). درنهایت از میان گزینه‌های موجود، تصمیمی که منجر به کمترین مقدار مصرف سوخت موتور می‌شود به عنوان تصمیم بهینه متاظر با هر گره در گام موردنظر مشخص می‌گردد. در پایان قسمت دوم

۱-۴ طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

کد، در هر گره از فضای حل، تصمیم بهینه که از گام زمانی قبلی به گام زمانی حاضر می‌رسد، تعیین شده است (شکل ۴-۳). در این قسمت، پیشرفت الگوریتم به صورت روبه‌جلو می‌باشد. در قسمت پایانی کد، مسیر بهینه برای متغیر حالت در طول زمان سیکل رانندگی تعیین می‌شود. در این



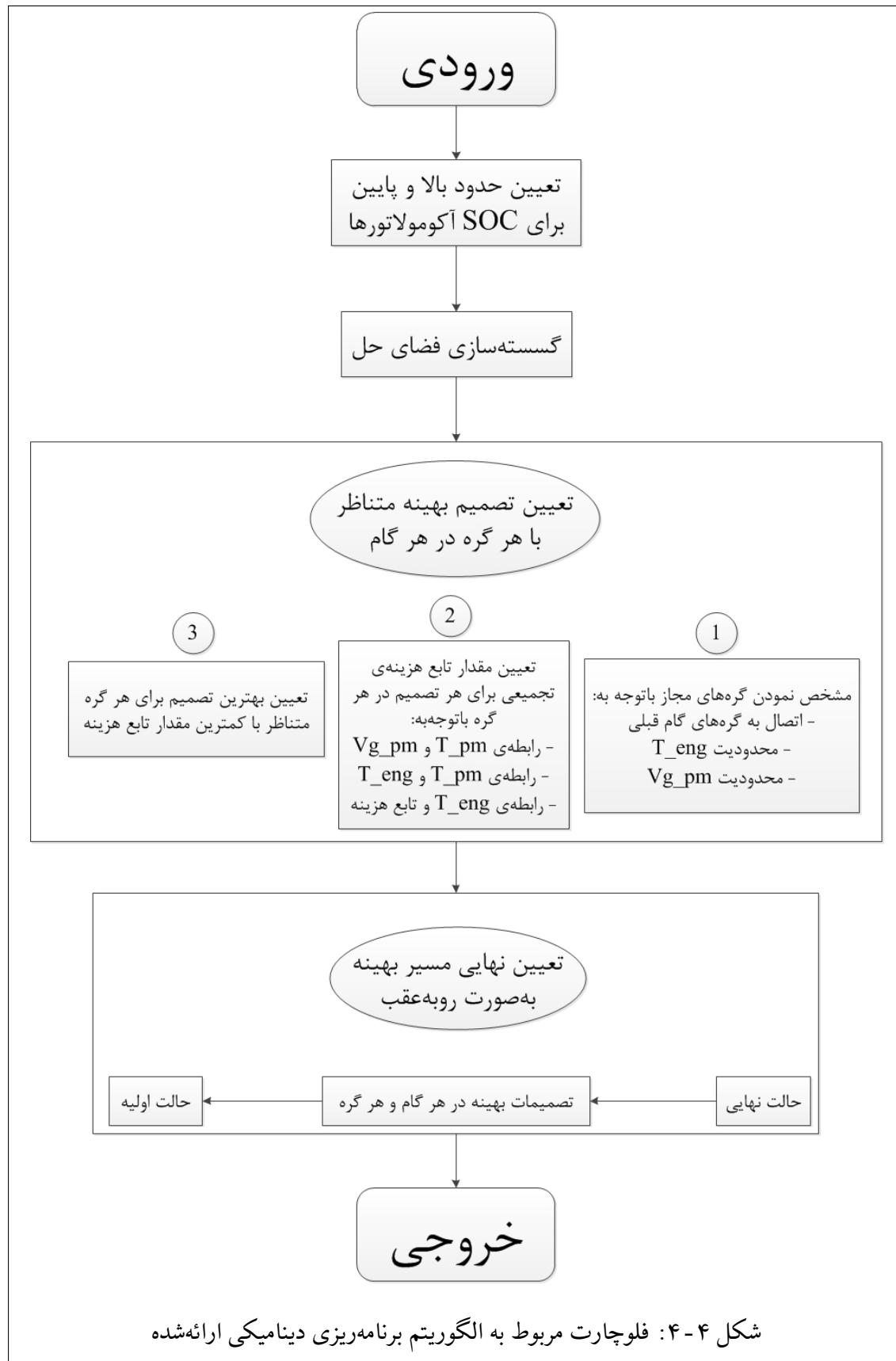
شکل ۴-۳: تعیین تصمیم بهینه برای هر گره در هر گام زمانی. این مورد در قسمت دوم از کد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی انجام می‌گیرد.

قسمت با مشخص بودن حالت نهایی سیستم، الگوریتم از انتهای مسیر آغاز و به سمت ابتدای مسیر حرکت می‌کند. با داشتن تصمیم بهینه برای هر گره در هر گام که در قسمت دوم کد بدست آمده است، الگوریتم به صورت روبه‌عقب پیشرفت کرده و در نهایت مسیر بهینه مشخص می‌شود. توجه شود که در این حالت دیگر نگرانی در خصوص انتخاب حالت به عنوان حالت بهینه که به حالات قبل متصل نباشد، وجود ندارد. روند اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

۴-۱-۴ معرفی چهار سیکل رانندگی استاندارد

با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده در بخش‌های قبلی، استراتژی کنترل بهینه متاظر با چهار سیکل رانندگی استاندارد بدست آمده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، چهار سیکل استاندارد به عنوان خوش‌های مرتع در طراحی استراتژی کنترل هوشمند حاضر مورداً استفاده قرار گرفته‌اند. برای تعیین سیکل‌های استاندارد از مجموعه‌ی سیکل‌های استاندارد ارائه شده توسط مؤسسه‌ی تحقیقاتی سیرا^{۱۰} استفاده شده است. مؤسسه‌ی مذکور در سال ۱۹۹۱، ۹ سیکل را به عنوان سیکل‌های رانندگی استاندارد یک خودروی سواری

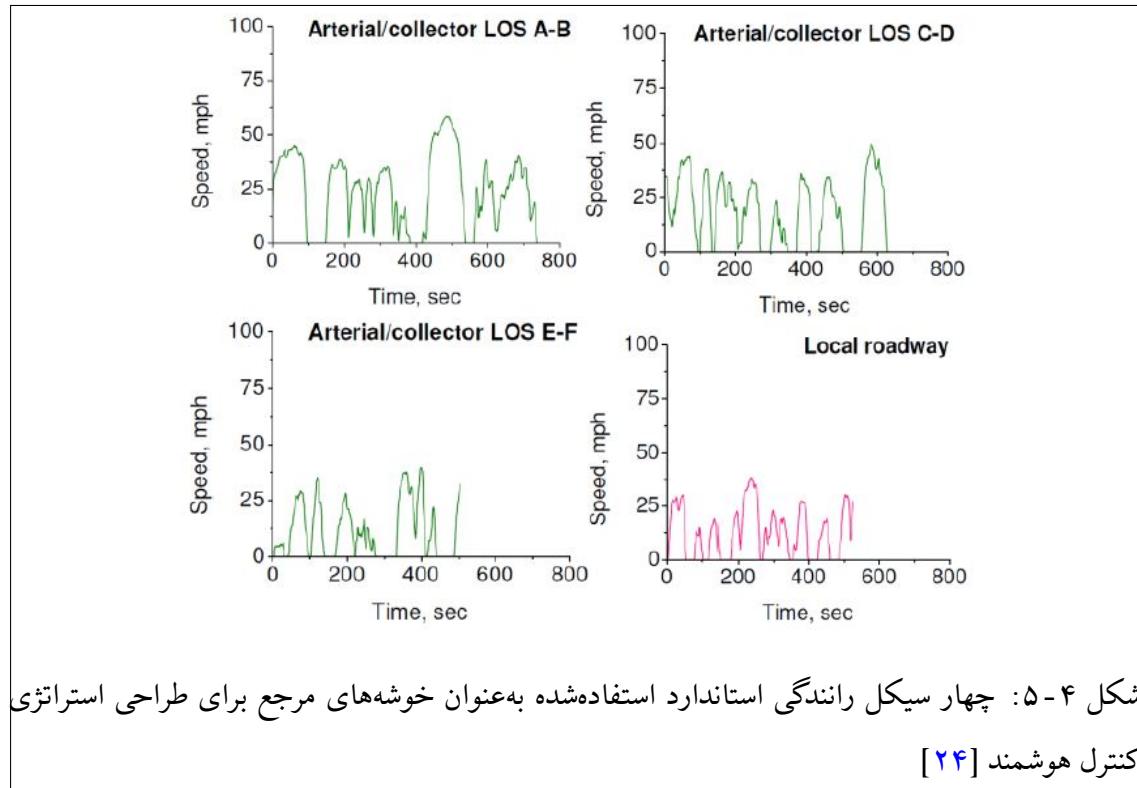
^{۱۰} Sierra Research Inc.



شکل ۴-۴: فلوچارت مربوط به الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده

۱-۴ طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

معرفی نمود ([۴۰]). از میان ۹ سیکل ارائه شده، ۵ مورد مربوط به حرکت خودرو در بزرگراه‌هاست و ۴ مورد دیگر مربوط به جاده‌های شهری همراه با شروع-توقف‌های بسیار می‌باشد. در این پایان‌نامه با توجه به مسیر حرکت اتوبوس‌های شهری که دارای شروع-توقف‌های بسیاری می‌باشد، تنها از ۴ مورد مربوط به جاده‌های شهری به عنوان سیکل‌های استاندارد مناسب استفاده شده است. چهار سیکل رانندگی موردنظر در شکل ۵-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: چهار سیکل رانندگی استاندارد استفاده شده به عنوان خوش‌های مرجع برای طراحی استراتژی کنترل هوشمند [۲۴]

۵-۱-۴ بررسی کیفیت عملکرد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، نتایج شبیه‌سازی مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با دو استراتژی کنترل قانون‌مند و بهینه در جدول ۱-۴ مقایسه شده است. این نتایج برای چهار سیکل استاندارد ارائه شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از استراتژی کنترل بهینه به مقدار چشمگیری مصرف سوخت اتوبوس را کاهش داده است.

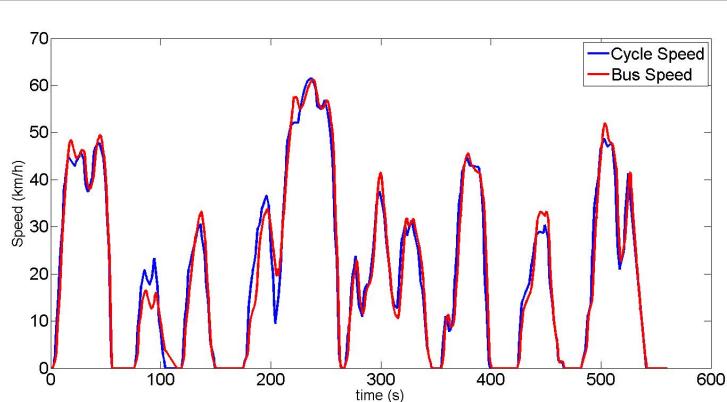
باتوجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که با استفاده از استراتژی کنترل بهینه بدست آمده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، مقدار متوسط مربعات خطای سرعت اتوبوس و سرعت سیکل رانندگی افزایش یافته است. باید درنظر داشت که در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده، تابع هزینه تنها شامل مصرف سوخت اتوبوس می‌باشد. از این‌رو، الگوریتم پیشنهادشده هیچ ضمانتی در مورد کاهش خطای سرعت اتوبوس ارائه نمی‌کند. بعلاوه مقدار خطای سرعت ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. نمودار سرعت اتوبوس و سیکل رانندگی برای سیکل Loc/Rod با استفاده از استراتژی کنترل‌های قانون‌مند و بهینه در شکل‌های

جدول ۱-۴: مقایسه مصرف سوخت اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی کنترل‌های قانونمند و بهینه

| خطای سرعت (mse) | درصد کاهش مصرف سوخت | مقدار مصرف سوخت (لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر) | استراتژی کنترل | سیکل رانندگی |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|----------------|--------------|
| ۰/۰۱۲ | ۰ | ۳۸/۳۵ | قانونمند | Col/Art a-b |
| ۰/۰۲۴۶ | ۱۰/۳۳ | ۳۴/۳۹ | بهینه | Col/Art a-b |
| ۰/۰۱۸۸ | ۰ | ۴۶/۳ | قانونمند | Col/Art c-d |
| ۰/۰۲۶۶ | ۹/۳۷ | ۴۱/۹۶ | بهینه | Col/Art c-d |
| ۰/۰۱۳۳ | ۰ | ۵۴/۴۸ | قانونمند | Col/Art e-f |
| ۰/۰۱۶۵ | ۸/۵ | ۴۹/۸۵ | بهینه | Col/Art e-f |
| ۰/۰۰۶۷ | ۰ | ۴۶/۲۱ | قانونمند | Loc Rod |
| ۰/۰۱۴۳ | ۶/۹۵ | ۴۳/۰ | بهینه | Loc Rod |

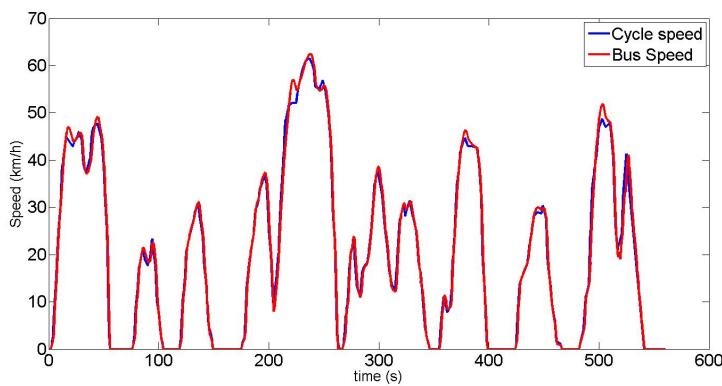
۶-۴ و ۷-۴ نشان داده شده است.

به منظور درک دلیل کاهش مصرف سوخت اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی کنترل بهینه، نمودار نقاط

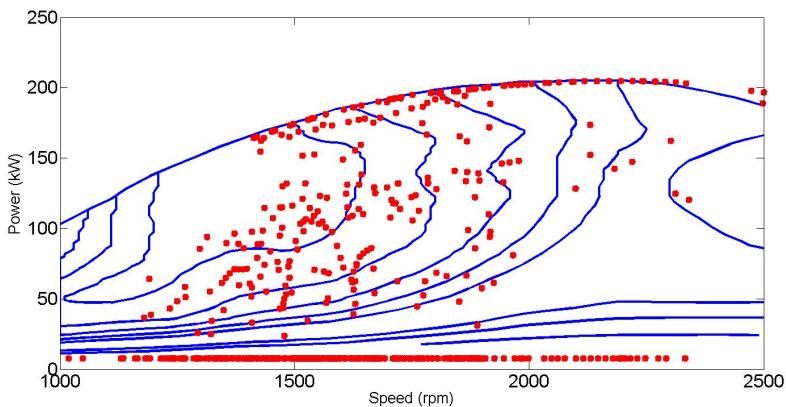


شکل ۶: سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل بهینه در سیکل رانندگی Loc/Rod در مقایسه با سرعت سیکل رانندگی مربوطه

عملکردی موتور احتراق داخلی در این حالت در شکل ۸-۴ برای سیکل رانندگی Col/Art a-b نشان داده شده است. این نمودار برای شبیه‌سازی با استراتژی کنترل قانونمند در شکل ۹-۴ آمده است. مشاهده می‌شود که با اعمال استراتژی کنترل بهینه، موتور احتراق داخلی در محدوده‌ی بازدهی با بازدهی عملکردی بالاتر فعالیت می‌کند. همین امر موجب کاهش مصرف سوخت شده است.



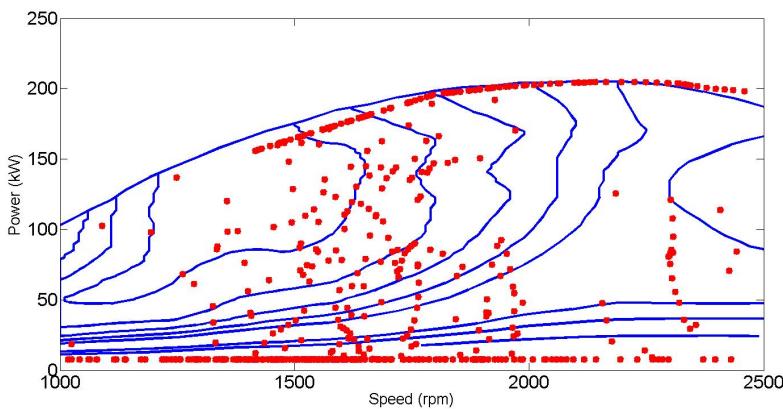
شکل ۴-۷: سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل قانونمند در سیکل رانندگی Loc/Rod در مقایسه با سرعت سیکل رانندگی مربوطه



شکل ۴-۸: نمودار نقاط عملکردی موتور احتراق داخلی در سیکل Col/Art a-b با اعمال استراتژی کنترل بهینه

۲-۴ طراحی مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی استراتژی کنترل بهینه

الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، یک الگوریتم آفلاین است. به این معنی که تنها با مشخص بودن یک سیکل رانندگی می‌توان الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی را روی سیکل اعمال نمود و استراتژی کنترل بهینه را برای آن سیکل مشخص بدست آورد. در این بخش، با استفاده از مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی یک مدل آنلاین متناظر با استراتژی کنترل بهینه‌ی بدستآمده برای هریک از چهار سیکل استاندارد ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی را تحت هریک از سیکل‌های استاندارد به صورت آنلاین شبیه‌سازی نمود و تأثیر استراتژی کنترل بهینه را برآن مشاهده کرد. توجه شود با بکارگیری



شکل ۴-۹: نمودار نقاط عملکردی موتور احتراق داخلی در سیکل Col/Art a-b با اعمال استراتژی کنترل قانون مند

مدل مذکور دسترسی به اطلاعات سیکل رانندگی پیش از شبیه‌سازی لزومی ندارد. متنزکر می‌شود که ایجاد مدل شبکه‌ی عصبی متناظر با هر سیکل استاندارد (خوشی مرجع) جهت پیاده‌سازی ایده‌ی استراتژی کنترل هوشمند الزامی است. در ادامه ابتدا نحوه آماده‌سازی داده‌های موجود جهت ایجاد مدل مناسب توضیح و سپس مجموعه‌مدل نهایی ارائه شده است.

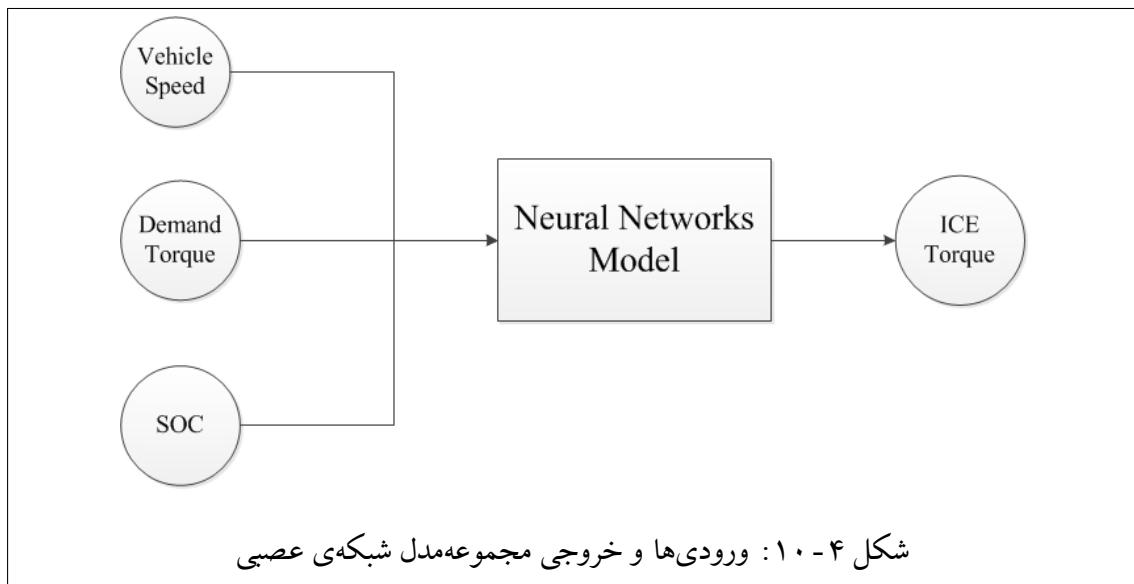
۱-۲-۴ آماده‌سازی داده‌ها جهت ایجاد مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی

برای انتخاب متغیرهای ورودی مجموعه‌مدل، سیگنال‌های ورودی و همچنین سیگنال متغیر حالت در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی در دسترس می‌باشد. در بخش قبل اشاره شد که سیگنال‌های سرعت سیکل رانندگی، گشتاور مطلوب راننده و ضریب دندنه‌ی گیریکس اتوماتیک اتوبوس متغیرهای ورودی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی هستند. از آنجایی که تعویض دندنه‌ی گیریکس تنها تابعی از سرعت اتوبوس است و سرعت اتوبوس نیز به صورت آنلاین در اختیار خواهد بود، سرعت اتوبوس به عنوان متغیر ورودی اول انتخاب می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت دینامیک الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، استفاده از متغیری که به تاریخچه‌ی سیکل رانندگی مرتبط باشد به عنوان ورودی مدل مناسب می‌باشد. سیگنال شتاب اتوبوس به خوبی می‌تواند تاریخچه‌ی یک سیکل رانندگی را در یک گام زمانی گذشته نشان دهد. سیگنال گشتاور مطلوب راننده رابطه‌ای مستقیم با شتاب اتوبوس دارد. براین اساس گشتاور مطلوب راننده نیز به عنوان متغیر ورودی دوم مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی در نظر گرفته می‌شود. متغیر ورودی سوم، متغیر حالت در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یعنی SOC آکومولاتور می‌باشد. از آنجایی که اتخاذ تصمیم بهینه در هر گام از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارتباط مستقیم با متغیر حالت سیستم دارد، انتخاب این متغیر به عنوان ورودی مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی منطقی به نظر می‌رسد.

مجموعه‌مدل حاضر به عنوان جایگزین یک استراتژی کنترل برای سیستم قوای محرکه بکار می‌رود. از این رو خروجی مدل بایستی متناظر با خروجی استراتژی کنترل موجود باشد. در بخش قبل اشاره شد که خروجی

الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی سیگنال‌های گشتاور موتور احتراق داخلی و گشتاور پمپ-مотор هیدرولیکی است. این دو متغیر طبق رابطه‌ی (۸-۴) با یکدیگر مرتبط هستند. براین اساس با دریافت سیگنال گشتاور مطلوب از بلوک راننده در مدل اتوبوس، تنها تعیین یکی از گشتاورهای دو منبع تولیدقدرت در سیستم قوای محرکه کفايت می‌کند. از آنجایی که مقدار مصرف سوخت موتور احتراق داخلی رابطه‌ی مستقیم با مقدار گشتاور تولیدشده توسط آن دارد، گشتاور موتور احتراق داخلی به عنوان متغیر خروجی مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی در نظر گرفته می‌شود. با این انتخاب، روی مقدار گشتاور موتور احتراق داخلی کنترل وجود دارد و مقدار گشتاور پمپ-مotor هیدرولیکی با تغییر مقدار گشتاور مطلوب راننده تغییر می‌کند. ورودی‌ها و خروجی مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است.

پس از تعیین متغیرهای ورودی و خروجی مدل، بایستی داده‌ها را نرم‌السازی کرد. به این معنی که مقادیر



تمامی داده‌های مربوط به چهار پارامتر مختلف (مربوط به سه متغیر ورودی و یک متغیر خروجی) را در یک محدوده با بیشینه و کمینه یکسان قرار داد. با اجرای این ایده، تأثیر هریک از پارامترها در ساخت مجموعه‌مدل نهایی یکسان خواهد بود. قبل از اجرای نرم‌السازی داده‌ها، محدوده‌ی تغییرات هر پارامتر به صورت مقادیر ارائه شده در جدول ۲-۴ است. برای نرم‌السازی داده‌ها، مقدار هر پارامتر را بر مقدار بیشینه‌ی محدوده‌ی تغییرات تقسیم می‌نماییم. در مورد گشتاور مطلوب راننده، فرآیند نرم‌السازی برای گشتاور شتاب‌گیری و ترمزگیری بطور جداگانه صورت گرفته است. توجه شود که مقدار کمینه‌ی محدوده‌ی تغییرات برای تمامی پارامترها برابر صفر است. پس از نرم‌السازی، محدوده‌ی تغییرات تمامی پارامترها بین صفر و یک می‌باشد.

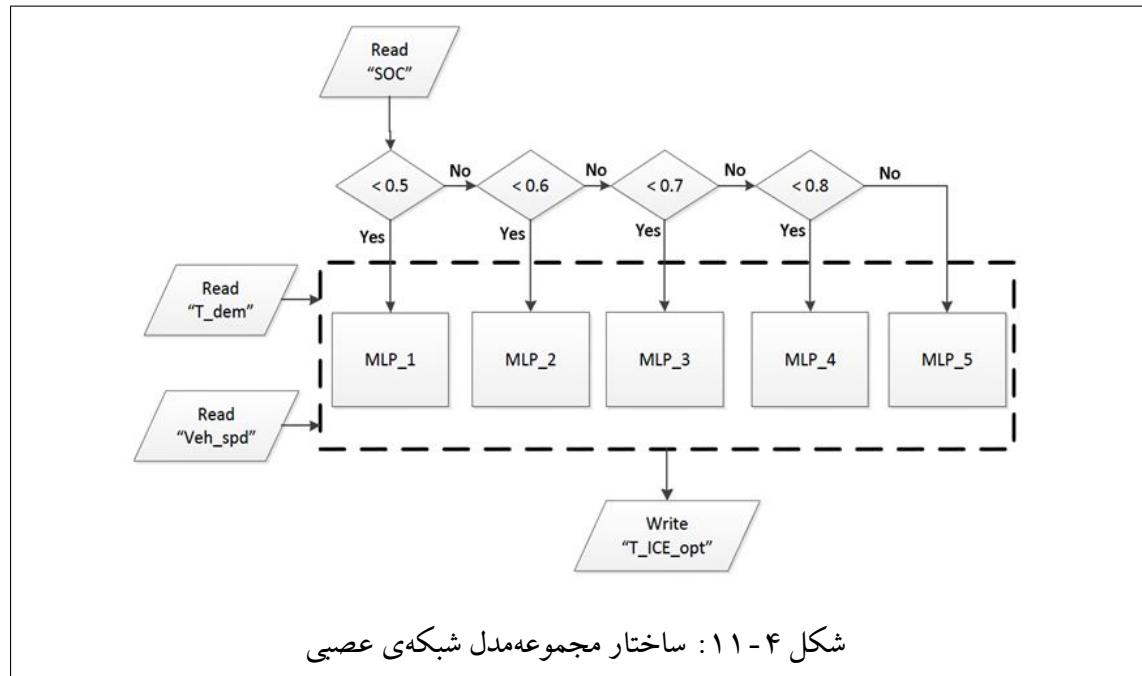
۲-۲-۴ ساختار مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی

در این قسمت با استفاده از داده‌های نرم‌السازی شده، مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی ایجاد شده است. با توجه به ماهیت بسیار غیرخطی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، تنها استفاده از یک شبکه‌ی عصبی توانایی

جدول ۲-۴: محدوده‌ی پارامترهای ورودی و خروجی مجموعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی قبل از نرمال‌سازی

| محدوده‌ی تغییرات | پارامتر |
|--------------------------|---------------------------|
| (۰، ۱۰۰) کیلومتر بر ساعت | سرعت اتوبوس |
| (-۶۵۰، ۱۱۰۰) نیوتون‌متر | گشتاور مطلوب راننده |
| (۰، ۱) | SOC |
| (۰، ۱۱۰۰) نیوتون‌متر | گشتاور موتور احتراق داخلی |

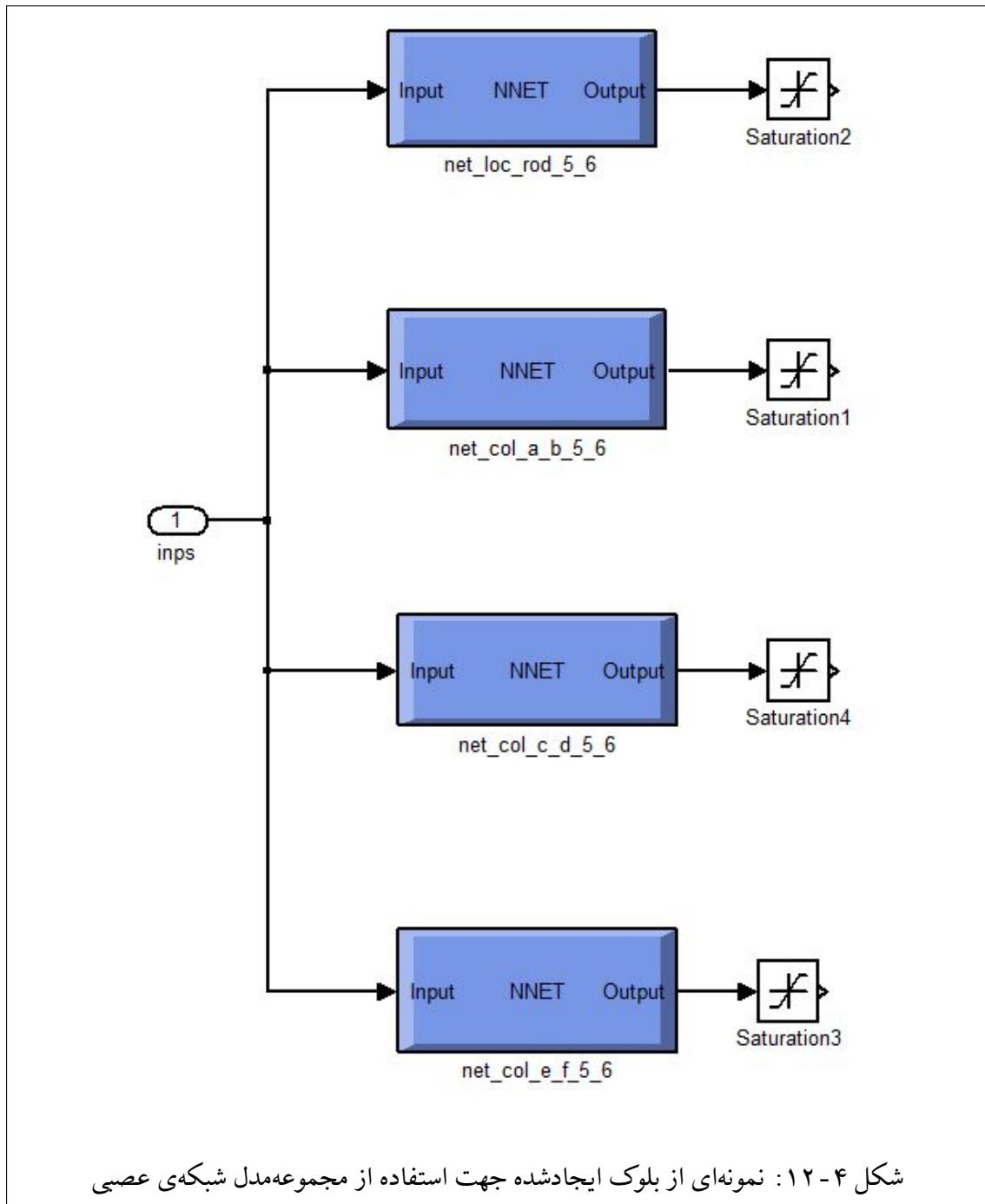
مدل‌سازی الگوریتم را ندارد. از این‌رو داده‌ها برای هریک از چهار سیکل استاندارد به ۵ یا ۶ مجموعه‌ی مستقل تقسیم‌بندی شده‌اند. این تقسیم‌بندی براساس تغییرات SOC صورت گرفته‌است. به عنوان مثال برای داده‌های با SOC بین ۰/۰ و ۰/۷ یک شبکه‌ی عصبی با دو ورودی سرعت اتوبوس و گشتاور مطلوب راننده ایجاد شده‌است. برای سایر بازه‌های SOC نیز این روند با حفظ گام ۱/۰ تکرار شده‌است. با توجه به پایین‌بودن تعداد داده‌ها در بازه‌ی SOC کمتر از ۰/۵، این بازه با ایجاد یک یا دو شبکه‌ی عصبی مدل‌سازی شده‌است. درنهایت متاظر با هر سیکل راننده‌ی استاندارد مجموعه‌ای از ۵ یا ۶ شبکه‌ی عصبی ایجاد شده‌است. هریک از شبکه‌های عصبی شامل دو لایه‌ی درونی و در هر لایه دارای ۲۰ تا ۶۰ نرون (متغیر در بازه‌های مختلف) می‌باشد. ایجاد شبکه‌ها با استفاده از جعبه‌ای از نرم‌افزار MATLAB nntool در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته‌است. برای تعیین بهترین تعداد نرون در هر لایه، یک جستجوی جامع در میان گرینه‌های موجود انجام شده‌است. شماتیک مجموعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی ارائه شده در شکل ۱۱-۴ ارائه شده‌است. پس از طراحی ساختار مجموعه‌ی مدل



شکل ۱۱-۴: ساختار مجموعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی

شبکه‌ی عصبی، مدل هر شبکه در محیط Simulink ایجاد شده‌است. برای ایجاد شبکه از دستور gensim

استفاده شده است. بدین ترتیب، به منظور استفاده از مجموعه مدل‌های ساخته شده در ساختار استراتژی کنترل هوشمند، متناظر با هر بازه از مقدار SOC، یک بلوک تشکیل شده است. این بلوک شامل شبکه‌های عصبی متناظر با بازه‌ی SOC موردنظر برای چهار سیکل رانندگی استاندارد است. نمونه‌ای از بلوک مذکور در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است.



۳-۲-۴ بررسی کیفیت عملکرد مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی

در ایجاد شبکه‌های عصبی مقدار متوسط مربعات خطأ^{۱۱} به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شده است. مقادیر این معیار برای تمامی شبکه‌های ایجاد شده در جداول ۳-۴ تا ۳-۶ نشان داده شده است. پایین بودن مقدار متوسط مربعات خطأ بیان‌گر کیفیت بالای مدل‌ها می‌باشد.

جدول ۳-۳: مقادیر متوسط مربعات خطأ (mse) ی داده‌های آموزش برای مجموعه‌مدل متناظر با سیکل

رانندگی Collector/Arterial a-b

| mse مقدار | تعداد نرون در لایه‌ی دوم | تعداد نرون در لایه‌ی اول | SOC بازه |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| ۰/۰۰۰۹ | ۴۰ | ۳۰ | (۰/۲, ۰/۴) |
| ۰/۰۰۲۴ | ۴۰ | ۳۰ | (۰/۴, ۰/۵) |
| ۰/۰۱۱ | ۱۰ | ۱۵ | (۰/۵, ۰/۶) |
| ۰/۰۱۸ | ۲۰ | ۱۵ | (۰/۶, ۰/۷) |
| ۰/۰۲۵ | ۴۵ | ۳۵ | (۰/۷, ۰/۸) |
| ۰/۰۳۸ | ۴۵ | ۳۵ | (۰/۸, ۰/۹) |

جدول ۳-۴: مقادیر متوسط مربعات خطأ (mse) ی داده‌های آموزش برای مجموعه‌مدل متناظر با سیکل

رانندگی Collector/Arterial c-d

| mse مقدار | تعداد نرون در لایه‌ی دوم | تعداد نرون در لایه‌ی اول | SOC بازه |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| ۰/۰۰۰۹ | ۴۰ | ۳۰ | (۰/۲, ۰/۴) |
| ۰/۰۰۲۴ | ۴۰ | ۳۰ | (۰/۴, ۰/۵) |
| ۰/۰۰۹۷ | ۴۵ | ۳۵ | (۰/۵, ۰/۶) |
| ۰/۰۰۷ | ۴۵ | ۳۵ | (۰/۶, ۰/۷) |
| ۰/۰۱۶ | ۵۰ | ۳۵ | (۰/۷, ۰/۸) |
| ۰/۰۱۳ | ۴۰ | ۳۰ | (۰/۸, ۰/۹) |

^{۱۱} Mean Squared Error

جدول ۴-۵: مقادیر متوسط مربعات خطأ (mse) ی داده‌های آموزش برای مجموعه مدل متناظر با سیکل رانندگی Collector/Arterial e-f

| mse | مقدار | تعداد نرون در لایه‌ی دوم | تعداد نرون در لایه‌ی اول | بازه SOC |
|--------|-------|--------------------------|--------------------------|------------|
| ۰/۰۰۰۵ | | ۱۰ | ۵ | (۰/۲, ۰/۴) |
| ۰/۰۲۹ | | ۴۰ | ۲۰ | (۰/۴, ۰/۵) |
| ۰/۰۲۷ | | ۱۰ | ۳۰ | (۰/۵, ۰/۶) |
| ۰/۰۰۹ | | ۵۰ | ۴۵ | (۰/۶, ۰/۷) |
| ۰/۰۱۵ | | ۵۰ | ۳۰ | (۰/۷, ۰/۸) |
| ۰/۰۲۳ | | ۵۰ | ۴۵ | (۰/۸, ۰/۹) |

جدول ۴-۶: مقادیر متوسط مربعات خطأ (mse) ی داده‌های آموزش برای مجموعه مدل متناظر با سیکل رانندگی Local Road

| mse | مقدار | تعداد نرون در لایه‌ی دوم | تعداد نرون در لایه‌ی اول | بازه SOC |
|-------|-------|--------------------------|--------------------------|------------|
| ۰/۰۰۵ | | ۱۵ | ۱۰ | (۰/۲, ۰/۵) |
| ۰/۰۳۱ | | ۶۰ | ۳۰ | (۰/۵, ۰/۶) |
| ۰/۰۲۵ | | ۶۰ | ۴۰ | (۰/۶, ۰/۷) |
| ۰/۰۱۱ | | ۶۰ | ۳۰ | (۰/۷, ۰/۸) |
| ۰/۰۱ | | ۴۰ | ۲۰ | (۰/۸, ۰/۹) |

علاوه بر مقادیر خطای مدل‌سازی، می‌توان کیفیت عملکرد مجموعه مدل‌ها را در شبیه‌سازی مدل اتوبوس نیز مشاهده نمود. در جدول ۷-۴ مقادیر مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل بدست‌آمده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی بصورت آفلاین و آنلاین مقایسه شده است. همان‌طور که اشاره شد، اعمال استراتژی کنترل بهینه بصورت آنلاین با استفاده از مجموعه مدل شبکه‌ی عصبی انجام گرفته است. مشاهده می‌شود که اختلاف مقادیر مصرف سوخت ناچیز است.

جدول ۴-۷: مقایسه مقادیر مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک با اعمال استراتژی کنترل بهینه بصورت آفلاین و آنلاین

| استراتژی کنترل | سیکل | سیکل | سیکل | سیکل | Loc/Rod |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|
| | Col/Art e-f | Col/Art c-d | Col/Art a-b | | Col/Art e-f |
| بهینه‌ی آفلاین | ۴۹/۸۵ | ۴۱/۹۶ | ۳۴/۳۹ | ۴۳/۰ | |
| بهینه‌ی آنلاین | ۴۹/۰۹ | ۴۰/۹۵ | ۳۴/۴۲ | ۴۲/۹۶ | |

۳-۴ طراحی واحد شناسایی سیکل رانندگی

به منظور طراحی استراتژی کنترل هوشمند، بایستی روندی برای شناسایی هر سیکل رانندگی طراحی شود. مقصود از شناسایی یک سیکل رانندگی، تعیین مقادیر مجموعه‌ای از مشخصات است که آن سیکل را از سایر سیکل‌ها تمیز دهد. پارامترهای بسیاری وجود دارند که می‌توان از آنها به عنوان مشخصه‌ی ^{۱۲} یک سیکل رانندگی استفاده نمود. در سال ۲۰۰۱، اریکسون ^{۱۳} تعداد ۶۹ مشخصه را برای معرفی یک سیکل رانندگی کرد [۴۱]. پس از آن مجموعه‌های شامل تعداد کمتری مشخصه نیز جهت شناسایی یک سیکل رانندگی بکار رفته است ([۴۲]، [۴۴] و [۲۷]). در این پایان‌نامه با توجه به موارد استفاده شده توسط عبدالهی در [۲۷]، ۳۴ پارامتر به عنوان مجموعه‌ی مرجع مشخصات هر سیکل رانندگی در نظر گرفته شده است (جدول ۴-۸). پارامترهای ارائه شده توسط عبدالهی جهت کاربرد برای خودروی سواری بیان شده‌اند. در اینجا پارامترها به منظور کاربرد برای اتوبوس اصلاح شده‌اند.

در جدول ۴-۸ پارامترهای انرژی جنبشی مثبت ^{۱۴} که طبق رابطه‌ی

$$RPA = \frac{1}{x} \int v a^+ dt \quad (9-4)$$

تعیین می‌شود و شتاب مثبت نسبی ^{۱۵} که برابر است با

$$PKE = \frac{1}{x} \left(\sum v_f^* - v_s^* \right), \quad \text{when } dv/dt > 0. \quad (10-4)$$

اولین بار توسط اریکسون معرفی شدند.

پس از معرفی مجموعه‌ی مرجع مشخصات، بایستی تعیین شود که کدام مشخصات و چه تعدادی از آنها برای شناسایی یک سیکل و بدنبال آن خوشبندی مجموعه‌ای از سیکل‌های رانندگی کفايت می‌کند. کاهش تعداد مشخصات، علاوه بر انجام یک خوشبندی مناسب از پیچیدگی‌های طراحی نیز می‌کاهد. منظور از خوشبندی، دسته‌بندی مجموعه‌ای از سیکل‌های رانندگی در چند مجموعه‌ی مرجع است. در اینجا، چهار سیکل رانندگی استاندارد که در بخش ۴-۱-۴ ارائه شد، به عنوان مجموعه‌های مرجع در نظر گرفته شده‌اند.

^{۱۲} Feature

^{۱۳} E. Ericsson

^{۱۴} Positive Kinetic Energy

^{۱۵} Relative Positive Acceleration

جدول ۴-۸: مجموعه‌ی مشخصات مرجع برای شناسایی یک سیکل رانندگی

| مشخصه | شماره | مشخصه | شماره |
|---|-------|---|-------|
| Average Deceleration (m/s^2) | ۱۰ | Average Speed (km/h) | ۱ |
| Maximum Deceleration (m/s^2) | ۱۱ | Maximum Speed (km/h) | ۲ |
| Percentage of time Deceleration is in (-0.2,0) m/s^2 | ۱۲ | Percentage of time Speed is in (0,10) km/h | ۳ |
| Percentage of time Deceleration is in (-0.4, -0.2) m/s^2 | ۱۳ | Percentage of time speed is in (10,20) km/h | ۴ |
| Percentage of time Deceleration is in (-0.6, -0.4) m/s^2 | ۱۴ | Percentage of time speed is between 20-30 km/h | ۵ |
| Percentage of time Deceleration is in (-0.8, -0.6) m/s^2 | ۱۵ | Percentage of time speed is between 30-40 km/h | ۶ |
| Percentage of time Deceleration is in (-1, -0.8) m/s^2 | ۱۶ | Percentage of time speed is between 40-50 km/h | ۷ |
| Percentage of time Deceleration is under -1 m/s^2 | ۱۷ | Percentage of time Speed is above 50 km/h | ۸ |
| Positive Kinetic Energy (PKE) m/s^2 | ۱۸ | Average Acceleration (m/s^2) | ۹ |

در ادامه‌ی این بخش، یک الگوریتم خوشبندی و بدنبال آن فرآیند تعیین مشخصات مناسب برای انجام خوشبندی ارائه شده‌است. در پایان، کیفیت خوشبندی انجام‌شده روی ۱۳ سیکل نمونه ارزیابی شده است. همچنین مقادیر ضرائب شباهت در صورتی که یکی از سیکل‌های مرجع به عنوان سیکل ورودی در نظر گرفته شود نیز ارائه شده است.

۱-۳-۴ الگوریتم خوشبندی فازی

بیان یک سیکل رانندگی به عنوان زیرمجموعه‌ای از یک سیکل مرجع بطوریکه عضو سایر سیکل‌های مرجع نباشد، امری غلط به نظر می‌رسد. این موردی است که تاکنون در تمامی کنترل‌های هوشمند طراحی شده برای خودروهای هیبرید لحاظ شده است. نمونه‌ای از این گونه خوشبندی سیکل رانندگی در سال ۲۰۱۱ توسط منتظری و فتوحی ارائه شده است [۴۵]. در مقابل می‌توان برای یک سیکل رانندگی درجات عضویتی متناسب

جدول ۴-۸: مجموعه مشخصات مرجع برای شناسایی یک سیکل رانندگی (ادامه)

| مشخصه | شماره | مشخصه | شماره |
|---|-------|--|-------|
| Number of stops per km | ۲۷ | Maximum Acceleration (m/s^2) | ۱۹ |
| Number of stops | ۲۸ | Percentage of time Acceleration is between $(0, 0.2) m/s^2$ | ۲۰ |
| Percentage of time Production of speed and acceleration is in $(0, 5) m^2/s^3$ | ۲۹ | Percentage of time Acceleration is between $0.2-0.4 m/s^2$ | ۲۱ |
| Percentage of time Production of speed and acceleration is in $(5, 10) m^2/s^3$ | ۳۰ | Percentage of time Acceleration is in $(0.4, 0.6) m/s^2$ | ۲۲ |
| Percentage of time Production of speed and acceleration is above $10 m^2/s^3$ | ۳۱ | Percentage of time Acceleration is in $(0.6, 0.8) m/s^2$ | ۲۳ |
| Percentage of time Production of speed and deceleration is in $(-5, 0) m^2/s^3$ | ۳۲ | Percentage of time Acceleration is in $(0.8, 1) m/s^2$ | ۲۴ |
| Percentage of time Production of speed and deceleration is in $(-10, -5) m^2/s^3$ | ۳۳ | Percentage of time Acceleration is above $1 m/s^2$ | ۲۵ |
| Percentage of time Production of speed and deceleration is under $-10 m^2/s^3$ | ۳۴ | Relative Positive Acceleration (RPA) m/s^2 | ۲۶ |

با هر سیکل مرجع بیان نمود. به عبارت دیگر، هر سیکل رانندگی با شدتی معین عضو تمامی سیکل‌های مرجع می‌باشد. در این بخش، ایده‌ی اخیر با استفاده از یک الگوریتم خوشبندی فازی ارائه شده است. در یک الگوریتم خوشبندی فازی برای عضویت هر داده در هر خوش، یک درجه‌ی عضویت تعیین می‌شود.

الگوریتم C-means [۴۶] یک الگوریتم پرکاربرد در حوزه‌ی خوشبندی است. در این الگوریتم تعداد خوشبندی مشخص است و برای تعیین مکان خوشبندی‌ها در فضای داده و همچنین درجه‌ی عضویت داده‌ها در هر خوشبندی، یک فرایند بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. روند الگوریتم خوشبندی فازی C-means در شکل ۱۳-۴ در شکل ۱۳-۴ [۴۶]. در مسأله‌ی حاضر، مراکز هر خوشبندی مشخص است (۴ سیکل رانندگی استاندارد) و ارائه شده است.

- Choose $\theta_j(0)$ as initial estimates for θ_j , $j = 1, \dots, m$.
- $t = 0$
- Repeat

—For $i = 1$ to N

* For $j = 1$ to m

$$\bullet u_{ij}(t) = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \left(\frac{d(x_i, \theta_j(t))}{d(x_i, \theta_k(t))} \right)^{\frac{1}{q-1}}}$$

* End {For-j}

—End {For-i}

— $t = t + 1$

—For $j = 1$ to m

* Parameter updating: Solve

$$\sum_{i=1}^N u_{ij}^q(t-1) \frac{\partial d(x_i, \theta_j)}{\partial \theta_j} = 0$$

with respect to θ_j and set $\theta_j(t)$ equal to this solution.

—End {For-j}

- Until a termination criterion is met.

شکل ۱۳-۴: الگوریتم خوشبندی فازی C-means

امکان بهینه‌یابی آنها در الگوریتم، مطابق روند ارائه شده در شکل ۱۳-۴ وجود ندارد. بنابراین در اینجا هدف اصلی از کاربرد الگوریتم خوشبندی فازی، تعیین درجات عضویت برای هر داده می‌باشد. این هدف مطابق روند ارائه شده برای الگوریتم C-means و بدون اعمال بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. در شکل ۱۳-۴، $d(x_i, \theta_j)$ معرف فاصله‌ی بین خوشبندی زام و داده‌ی i است. در الگوریتم فازی C-means بطور معمول از رابطه‌ی

$$d(x_i, x_j) = (x_i - x_j)^T (x_i - x_j) \quad (11-4)$$

به عنوان فاصله‌ی دو داده استفاده می‌شود. در اینجا نیز این رابطه بکار رفته است.

به منظور اجرای الگوریتم خوشبندی فازی ارائه شده در بالا، بایستی مشخصات مناسب جهت معرفی هر سیکل از میان ۳۴ مشخصه‌ی مرجع تعیین گردد. به بیان دیگر، بایستی بردارهای معرف سیکل‌های مرجع و سیکل‌های رانندگی نمونه مشخص شوند. این مورد در بخش بعد توضیح داده شده است.

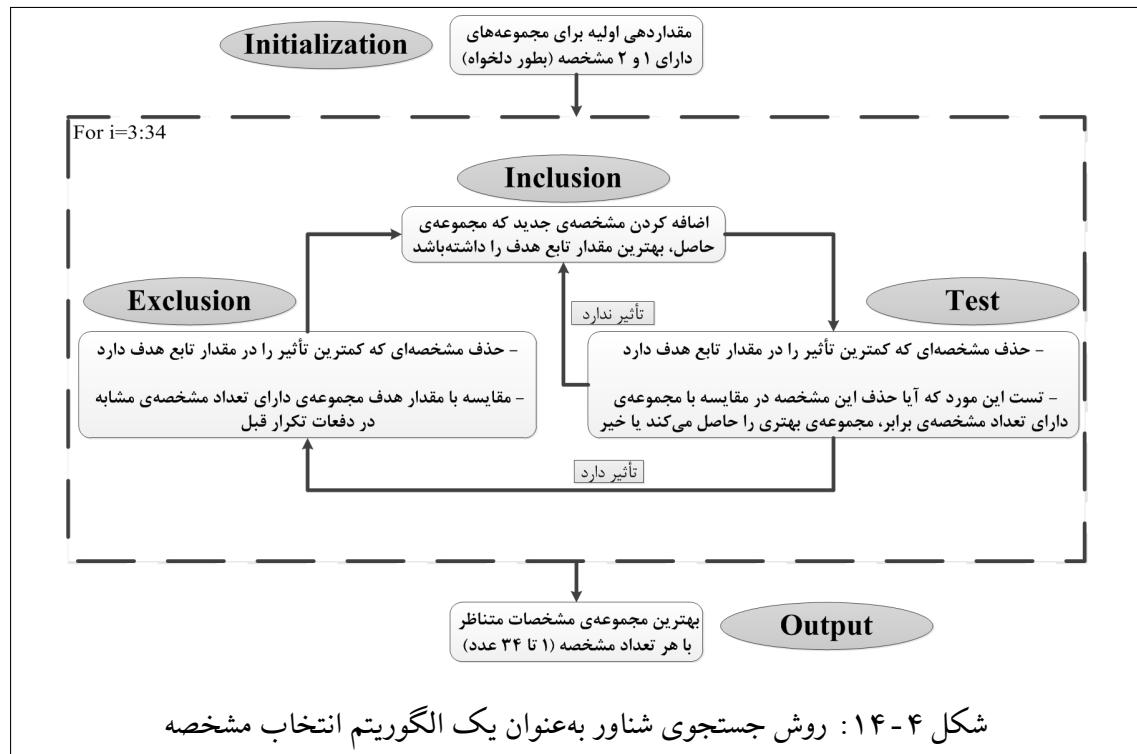
۲-۳-۴ الگوریتم انتخاب مشخصه

در اینجا یک الگوریتم انتخاب مشخصه برای تعیین بردارهای معرف هر سیکل رانندگی بکار رفته است. تابع هزینه‌ی این الگوریتم، با استفاده از الگوریتم خوشبندی فازی ارائه شده در بخش قبل بیان شده است. به عبارت دیگر مشخصات مناسب طوری انتخاب شده‌اند که خوشبندی فازی سیکل‌های رانندگی نمونه به بهترین نحو انجام گیرد. الگوریتم استفاده شده به عنوان الگوریتم انتخاب مشخصه، روش جستجوی شناور^{۱۶} [۴۶] نام دارد. در این الگوریتم، جستجو از کمترین تعداد مشخصه آغاز می‌شود و با اضافه کردن تدریجی سایر مشخصات ادامه می‌یابد. در هر مرحله از الگوریتم، امکان حذف مشخصات اضافه شده در گام‌های قبلی وجود دارد. با استفاده از این ایده، امکان دستیابی به یک انتخاب خوب متناظر با هر تعداد مشخصه فراهم می‌گردد. به عبارت دیگر، با اضافه کردن مشخصات در یک روند رو به جلو و حذف مشخصات نامناسب به صورت رو به عقب، در نهایت متناظر با هر تعداد مشخصه یک پاسخ مناسب ارائه شده است. توجه شود که هیچ فرایند بهینه‌سازی در الگوریتم جستجوی شناور وجود ندارد. از این‌رو نمی‌توان پاسخ‌های این الگوریتم را به عنوان جواب‌های بهینه در نظر گرفت. در عین حال، می‌توان پاسخ‌ها را به عنوان یک مجموعه‌ی مشخصات مناسب انتخاب کرد. عدم استفاده از فرایند بهینه‌سازی، از پیچیدگی‌های محاسباتی الگوریتم کاسته است. این در حالی است که پاسخ‌ها از مورد بهینه دور نیستند [۴۶]. الگوریتم جستجوی شناور در شکل ۱۴-۴ ارائه شده است.

به منظور استفاده از الگوریتم ارائه شده، یک کد نوشته شده است. در این کد، ابتدا با انتخاب دو مشخصه به صورت دلخواه مجموعه‌های شامل یک و دو پارامتر برای معرفی سیکل‌های رانندگی ایجاد شده‌اند. در گام بعدی، مشخصه‌ای که در صورت اضافه شدن، کمترین مقدار تابع هزینه را به همراه خواهد داشت، به مجموعه‌ی مشخصات اضافه می‌گردد. در مرحله‌ی تست، پارامتری که کمترین تأثیر را در مقدار تابع هزینه دارد، حذف می‌شود. سپس مجموعه‌ی حاضر، با مجموعه‌ی شامل تعداد پارامتر برابر مقایسه می‌شود. چنانچه مقدار تابع هزینه برای مجموعه‌ی جدید از مقدار مشابه در مجموعه‌ی قدیمی کمتر باشد، جایگزین می‌گردد. در صورت بهبود تابع هزینه در گام تست، روند حذف مشخصات به صورت رو به عقب ادامه می‌یابد تا به مجموعه‌ی شامل یک پارامتر برسیم. روند فوق شامل سه مرحله‌ی اضافه، تست و حذف مشخصه ادامه می‌یابد تا در نهایت متناظر با هر تعداد مشخصه، بهترین مجموعه انتخاب گردد.

همان‌طور که در شکل ۱۴-۴ مشاهده می‌شود در هر مرحله، عملیات با بیشینه نمودن یک تابع هزینه همراه است. در مسئله‌ی حاضر، تابع هزینه طوری تعریف شده است که برای هر تعداد مشخصه، به بهترین خوشبندی برسیم. تابع هزینه‌ی استفاده شده در الگوریتم انتخاب مشخصه به صورت

^{۱۶}Floating Search Method



$$J = \alpha J_1^q + \beta J_2 + (1 - \alpha - \beta) J_3 \quad (12-4)$$

می‌باشد که در آن α و β ضرایب وزنی ثابت متناظر با هر جمله از تابع هزینه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این تابع هزینه شامل سه جمله می‌باشد:

- فاصله‌ی هر سیکل رانندگی نمونه از مرکز هر خوشه (سیکل رانندگی مرجع) با لحاظ نمود مقادیر درجات عضویت (این تابع در الگوریتم خوشبندی فازی C-means به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته می‌شود). هرچه این فاصله کمتر باشد، کیفیت خوشبندی بالاتر است. مقدار این جمله از تابع هزینه طبق رابطه‌ی ۱۳-۴ بدست می‌آید.

$$J_1^q(\theta, U) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m u_{ij}^q d(x_i, \theta_j) \quad (13-4)$$

- فاصله‌ی مرکز خوشه‌ها (سیکل‌های مرجع) از یکدیگر. بیشتر بودن فاصله‌ی میان مرکز خوشه‌ها به معنای بالاتر بودن قدرت تفکیک خوشه‌ها و همچنین پوشش فضای داده‌ی بیشتر است. مقدار این جمله از تابع هزینه طبق رابطه‌ی ۱۴-۴ بدست می‌آید.

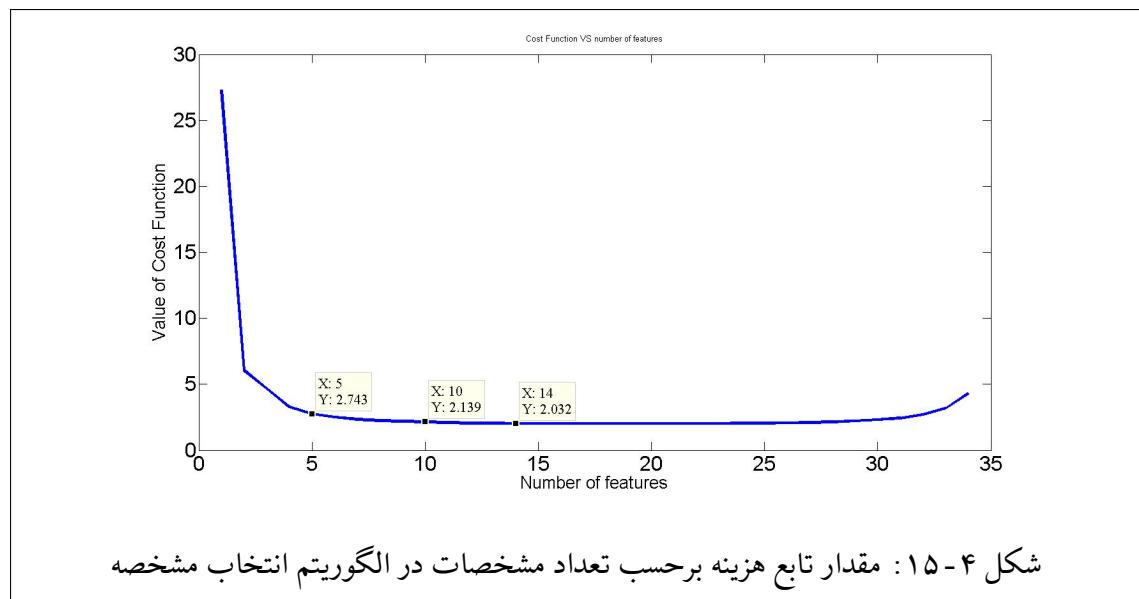
$$J_2(\theta) = (\min_{i,j} d(\theta_i, \theta_j))^{-1} \quad (14-4)$$

- فاصله‌ی میانگین سیکل‌های نمونه از میانگین سیکل‌های مرجع. هرچه این فاصله کمتر باشد، مجموعه‌ی خوش‌ها فضای ورودی را بیشتر پوشش می‌دهد. مقدار این جمله از تابع هزینه طبق رابطه‌ی ۱۵-۴ بدست می‌آید.

$$J_3(\theta, X) = d(\theta_m, X_m) \quad (15-4)$$

در روابط فوق، فاصله‌ی بین هر دو سیکل با استفاده از رابطه‌ی ۱۱-۴) بیان شده‌است. در مورد ضرائب α و β به ذکر این نکته اکتفا می‌شود که با استفاده از یک جستجوی جامع، محدوده‌ی مناسب برای هر دو پارامتر تعیین شده‌است. این محدوده برای α برابر $0/2, 0/35$ و برای پارامتر β $0/1, 0/2$ است. در تعیین محدوده‌ی بهینه، مقدار تابع هزینه و همچنین نمایش ظاهری خوش‌بندی درنظر بوده‌است. درنهایت مقادیر این دو ضریب به ترتیب برابر $0/25$ و $0/15$ انتخاب شده‌است.

با اجرای الگوریتم انتخاب مشخصه، تعداد ۱۰ پارامتر به عنوان تعداد مشخصات کافی جهت دستیابی به یک خوش‌بندی مناسب روی سیکل‌های نمونه انتخاب شد. مقدار تابع هزینه بر حسب تعداد مشخصات در شکل ۱۵-۴ نشان داده شده‌است. با مقایسه‌ی مقادیر تابع هزینه برای مجموعه‌های شامل ۵، ۱۰ و ۱۴ مشخصه، روشن است که تعداد ۱۰ پارامتر مناسب می‌باشد. قابل ذکر است که به منظور یکسان‌سازی تأثیر هر پارامتر در مقدار تابع هزینه، مقادیر پارامترها با توجه به محدوده‌ی تغییرات آنها نرمال شده‌اند. مشخصات انتخاب شده



به منظور معرفی یک سیکل رانندگی در جدول ۹-۴ ارائه شده‌است. تمامی این مشخصات تنها با استفاده از سرعت یک سیکل رانندگی قابل دستیابی است.

جدول ۴-۹: مجموعه‌ی ۱۰ مشخصه‌ی انتخاب شده جهت شناسایی یک سیکل رانندگی توسط الگوریتم

انتخاب مشخصه

| مشخصه | شماره | مشخصه | شماره |
|---|-------|---|-------|
| Percentage of time | ۶ | Percentage of time | ۱ |
| Deceleration is in (-0.4,-0.2) m/s ² | | speed is in (0,10) km/h | |
| Percentage of time | ۷ | Percentage of time | ۲ |
| Deceleration is in (-0.8,-0.6) m/s ² | | speed is in (10,20) km/h | |
| Relative Positive Acceleration (RPA) m/s ² | ۸ | Maximum Acceleration (m/s ²) | ۳ |
| Percentage of time Production of speed and acceleration is in (0, 5) m ² /s ³ | ۹ | Percentage of time Acceleration is in (0.2, 0.4) m/s ² | ۴ |
| Positive Kinetic Energy (PKE) m/s ² | ۱۰ | Percentage of time Acceleration is in (0.6, 0.8) m/s ² | ۵ |

۳-۳-۴ بررسی کیفیت عملکرد واحد شناسایی سیکل

در این بخش، کیفیت عملکرد الگوریتم‌های خوشبندی فازی و انتخاب مشخصه به عنوان واحد شناسایی سیکل رانندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ۱۳ سیکل نمونه به عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شده‌اند. مدت زمان سیکل‌های نمونه ۱۰۰ ثانية و همگی از سرعت صفر شروع و به سرعت صفر ختم می‌شوند. همچنین سیکل‌های نمونه از سیکل‌های رانندگی نوربورگ و تهران استخراج شده‌اند. این سیکل‌ها در شکل ۱۶-۴ نشان داده شده‌اند.

با استفاده از رابطه‌ی (۱۱-۴) به عنوان فاصله، فاصله‌ی هر سیکل نمونه از بردار با مقادیر صفر برای تمامی پارامترها (به عنوان نقطه‌ی مرجع) بدست آمده است. با استفاده از همین روش، فاصله‌ی ۴ سیکل رانندگی استاندارد نیز از نقطه‌ی مرجع بدست آمده است. سپس مقادیر فاصله‌ی سیکل‌ها از مرجع در یک نمودار ارائه شده است (شکل ۱۷-۴). نحوه توزیع مراکز خوشبندی و همچنین موقعیت قرارگیری سیکل‌های نمونه در این نمودار بیانگر کیفیت مناسب فرایند خوشبندی است. مقادیر درجات تشابه برای هر سیکل نمونه متناظر با هر سیکل استاندارد (مرکز خوش) در جدول ۱۰-۴ ارائه شده است.

ضرائب ارائه شده در جدول ۱۰-۴، با مشاهده فاصله‌ی سیکل‌های نمونه از هر مرکز خوش قابل توجیه است. این فواصل در جدول ۱۱-۴ آمده است. مشاهده می‌شود که هر سیکل بیشترین ضریب عضویت را در خوش‌های دارد که کمترین فاصله را با مرکز آن خوش داشته باشد. در پایان، سیکل Local Road که یکی

جدول ۱۰ - ۴ : مقادیر درجات عضویت هر سیکل رانندگی در خوشه‌های مرجع

| شماره‌ی سیکل | خوشه‌ی اول | خوشه‌ی دوم | خوشه‌ی سوم | خوشه‌ی چهارم |
|--------------|------------|------------|------------|--------------|
| ۱ | ۰/۱۷۳۴ | ۰/۱۴۶۰ | ۰/۳۴۱۲ | ۰/۲۳۹۴ |
| ۲ | ۰/۱۸۹۹ | ۰/۰۹۷۸ | ۰/۱۹۷۷ | ۰/۵۱۴۶ |
| ۳ | ۰/۲۲۸۲ | ۰/۱۰۴۱ | ۰/۲۳۷۰ | ۰/۴۳۰۶ |
| ۴ | ۰/۱۷۹۱ | ۰/۱۲۳۱ | ۰/۳۰۱۱ | ۰/۳۹۶۸ |
| ۵ | ۰/۱۳۷۹ | ۰/۱۰۸۸ | ۰/۴۱۹۸ | ۰/۳۳۳۵ |
| ۶ | ۰/۱۷۱۳ | ۰/۰۷۳۲ | ۰/۲۳۰۸ | ۰/۵۲۴۷ |
| ۷ | ۰/۲۴۰۶ | ۰/۱۶۶۹ | ۰/۲۵۸۴ | ۰/۳۳۴۱ |
| ۸ | ۰/۲۴۵۷ | ۰/۱۸۱۴ | ۰/۲۵۴۸ | ۰/۳۱۸۰ |
| ۹ | ۰/۳۱۵۵ | ۰/۱۱۸۷ | ۰/۱۷۲۱ | ۰/۳۹۳۷ |
| ۱۰ | ۰/۲۸۹۸ | ۰/۱۲۰۶ | ۰/۱۷۰۶ | ۰/۴۱۹۰ |
| ۱۱ | ۰/۴۰۶۴ | ۰/۱۷۶۵ | ۰/۱۴۷۶ | ۰/۲۶۹۵ |
| ۱۲ | ۰/۲۳۶۸ | ۰/۱۲۸۲ | ۰/۱۵۶۵ | ۰/۴۷۸۴ |
| ۱۳ | ۰/۳۲۲۹ | ۰/۱۴۱۳ | ۰/۱۶۹۰ | ۰/۳۶۵۸ |

از سیکل‌های مرجع است، به عنوان ورودی واحد شناسایی سیکل درنظر گرفته شده است. مقادیر لحظه‌ای ضرائب شباht این سیکل به ۴ سیکل مرجع در شکل ۱۸-۴ نشان داده شده است. توجه شود که مشخصات سیکل‌های رانندگی مرجع در یک دوره‌ی کامل از سیکل استخراج شده است. این موضوع، عدم برابری ضریب شباht مربوط به سیکل Local Road با عدد ۱ را در زمان‌های ابتدایی سیکل در شکل ۱۸-۴ توجیه می‌نماید. هرچه زمان سیکل رانندگی به پایان نزدیک می‌شود، مقدار ضریب شباht به سیکل مرجع مشابه به سمت عدد ۱ میل می‌کند و سایر ضرائب شباht، صفر می‌شوند.

۴ - ۴ ساختار نهایی استراتژی کنترل هوشمند

پس از ارائه‌ی جداگانه‌ی قسمت‌های مختلف، در اینجا ساختار کامل استراتژی کنترل هوشمند بیان شده است. این ساختار در شکل ۱۹-۴ آمده است. در هنگام شبیه‌سازی اتوبوس به صورت آنلاین در سیکل رانندگی موردنظر، مقدار مشخصات انتخاب شده (خروجی الگوریتم انتخاب مشخصه) از ابتدای سیکل رانندگی تا لحظه‌ی حاضر، استخراج و براساس الگوریتم خوشبندی فازی، ضرائب شباht تعیین می‌شوند. همان‌طور که

جدول ۱۱-۴: مقادیر فاصله‌ی هر سیکل رانندگی با مراکز خوش‌های مرجع

| شماره‌ی سیکل | خوش‌های اول | خوش‌های دوم | خوش‌های سوم | خوش‌های چهارم |
|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| ۱ | ۰/۵۷۶۵ | ۰/۶۸۵۰ | ۰/۲۹۳۰ | ۰/۲۹۴۶ |
| ۲ | ۰/۲۴۶۳ | ۰/۴۷۸۱ | ۰/۲۳۶۵ | ۰/۰۹۰۹ |
| ۳ | ۰/۲۵۹۶ | ۰/۵۶۸۹ | ۰/۲۴۹۹ | ۰/۱۳۷۶ |
| ۴ | ۰/۲۹۵۵ | ۰/۴۲۹۹ | ۰/۱۷۵۷ | ۰/۱۳۳۳ |
| ۵ | ۰/۳۸۲۳ | ۰/۴۸۴۸ | ۰/۱۲۵۶ | ۰/۱۵۸۱ |
| ۶ | ۰/۱۷۱۵ | ۰/۴۰۱۲ | ۰/۱۲۷۲ | ۰/۰۵۶۰ |
| ۷ | ۰/۹۸۲۷ | ۱/۴۱۴۶ | ۰/۹۱۵۰ | ۰/۷۰۷۸ |
| ۸ | ۱/۰۲۶۸ | ۱/۳۹۰۹ | ۰/۹۹۰۱ | ۰/۷۹۳۴ |
| ۹ | ۰/۲۶۴۱ | ۰/۷۰۲۱ | ۰/۴۸۴۴ | ۰/۲۱۱۷ |
| ۱۰ | ۰/۱۹۱۸ | ۰/۴۶۰۸ | ۰/۳۲۵۹ | ۰/۱۳۲۷ |
| ۱۱ | ۰/۰۸۱۸ | ۰/۱۸۸۳ | ۰/۲۲۵۲ | ۰/۱۲۳۳ |
| ۱۲ | ۰/۱۸۴۷ | ۰/۳۴۱۲ | ۰/۲۷۹۵ | ۰/۰۹۱۴ |
| ۱۳ | ۰/۲۹۰۲ | ۰/۶۶۵۱ | ۰/۵۵۶۲ | ۰/۲۵۷۰ |

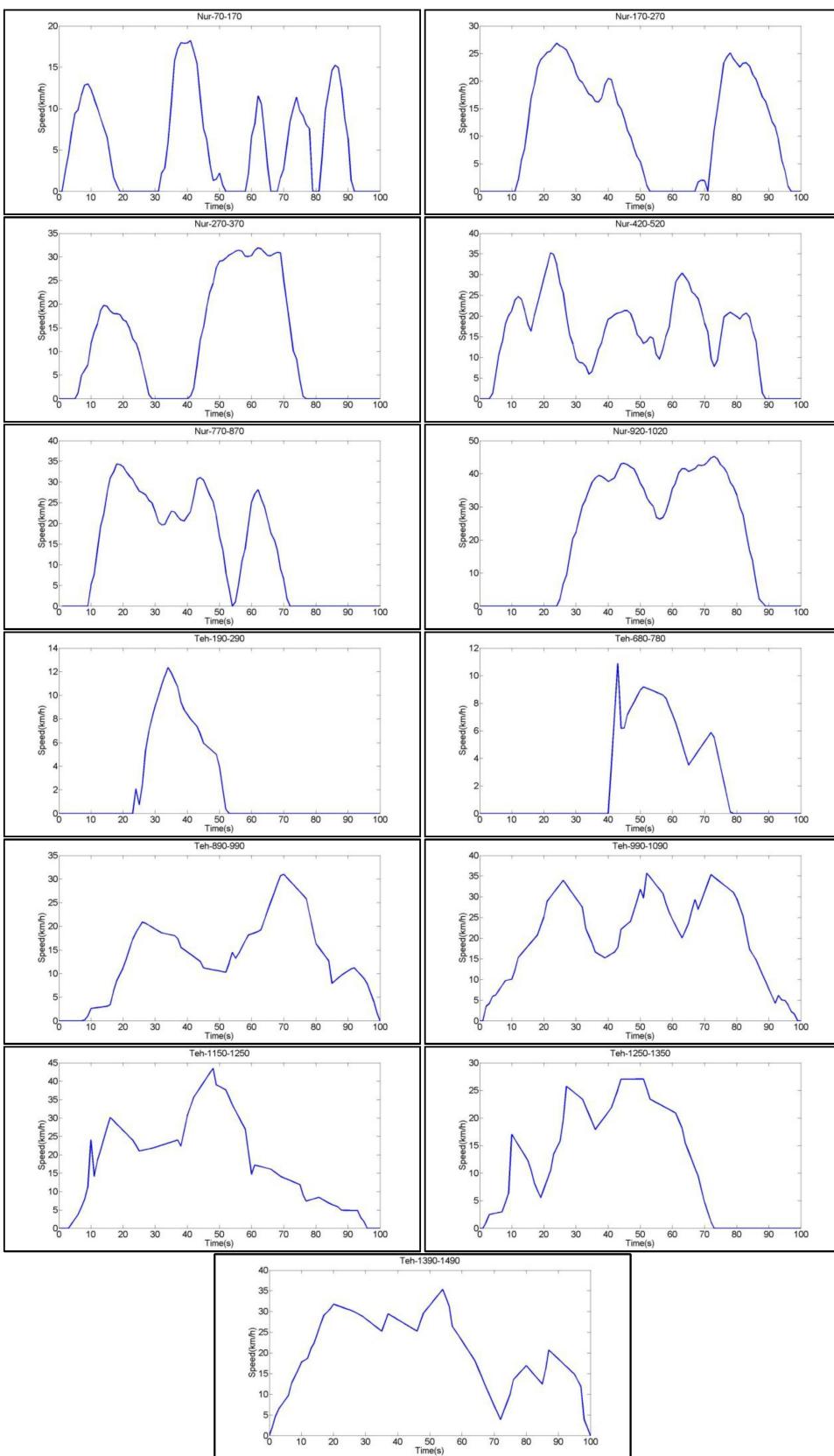
مشاهده می‌شود خروجی نهایی کنترلر هوشمند با استفاده از رابطه‌ی

$$T_{eng} = \sum_{i=1}^4 u_i T_i \quad (16-4)$$

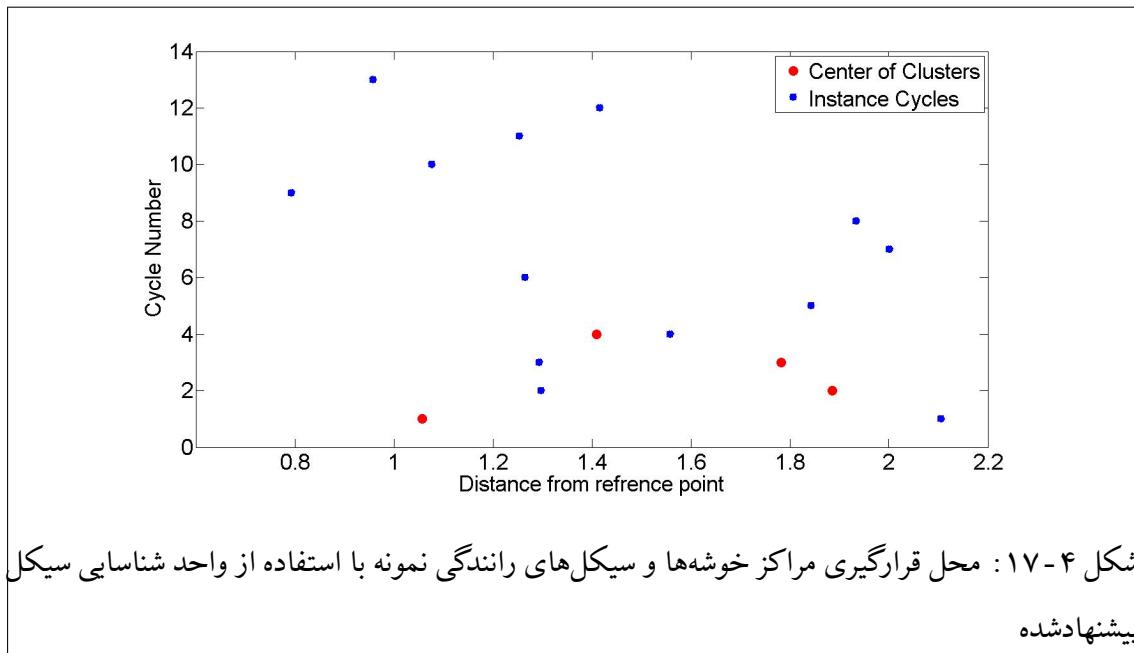
تعیین شده‌است. بعارت دیگر، ترکیب خطی وزن‌دار خروجی کنترلرهای بهینه متناظر با ۴ سیکل رانندگی استاندارد، خروجی کنترلر هوشمند را تشکیل می‌دهد. مقادیر وزن‌ها در این رابطه، همان درجات شباهت سیکل رانندگی موردنظر با سیکل‌های رانندگی استاندارد است که با استفاده از الگوریتم خوش‌بندی فازی تعیین شده‌است. بعلاوه، کنترلر هوشمند مقدار گشتاور موتور احتراق‌داخلی را تعیین می‌نماید. مقدار گشتاور پمپ-موتور هیدرولیکی در حالت موتوری از رابطه‌ی

$$T_{pm} = \max((T_{acc} - T_{eng}), 0) \quad (17-4)$$

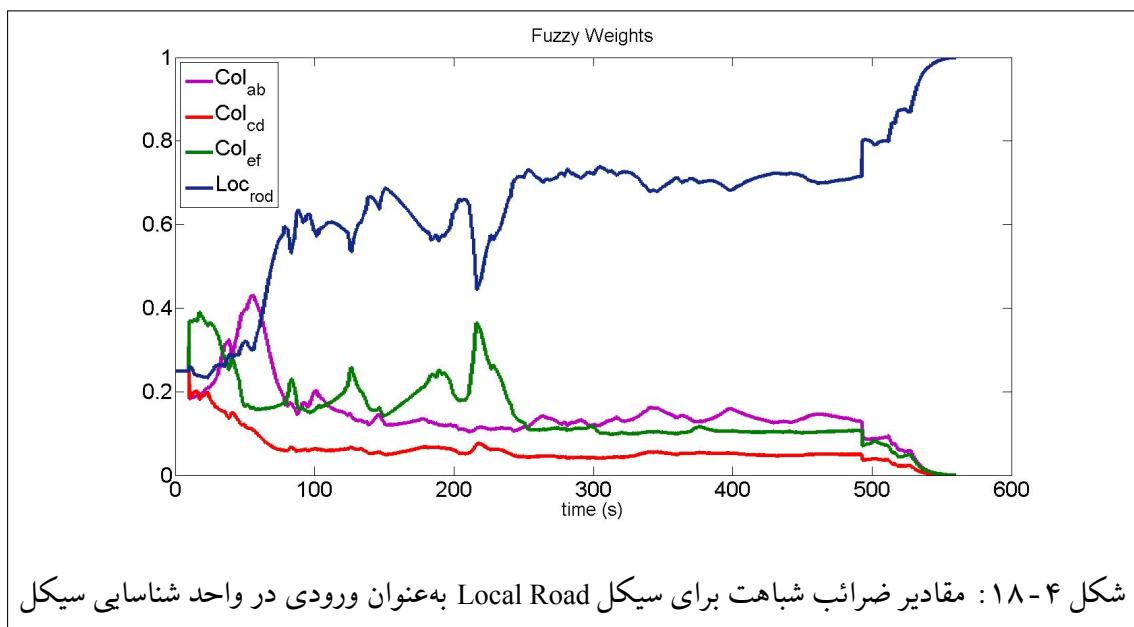
بدست می‌آید. همچنین، عملکرد ترمزگیری استراتژی کنترل هوشمند مشابه عملکرد استراتژی کنترل قانون‌مند است. یعنی، پمپ-موتور هیدرولیکی بیشترین توان منفی را تأمین می‌نماید و مابقی گشتاور منفی توسط ترمز مکانیکی اعمال می‌شود. خروجی کنترلر هوشمند در هر ثانیه از سیکل رانندگی بهروز می‌شود.



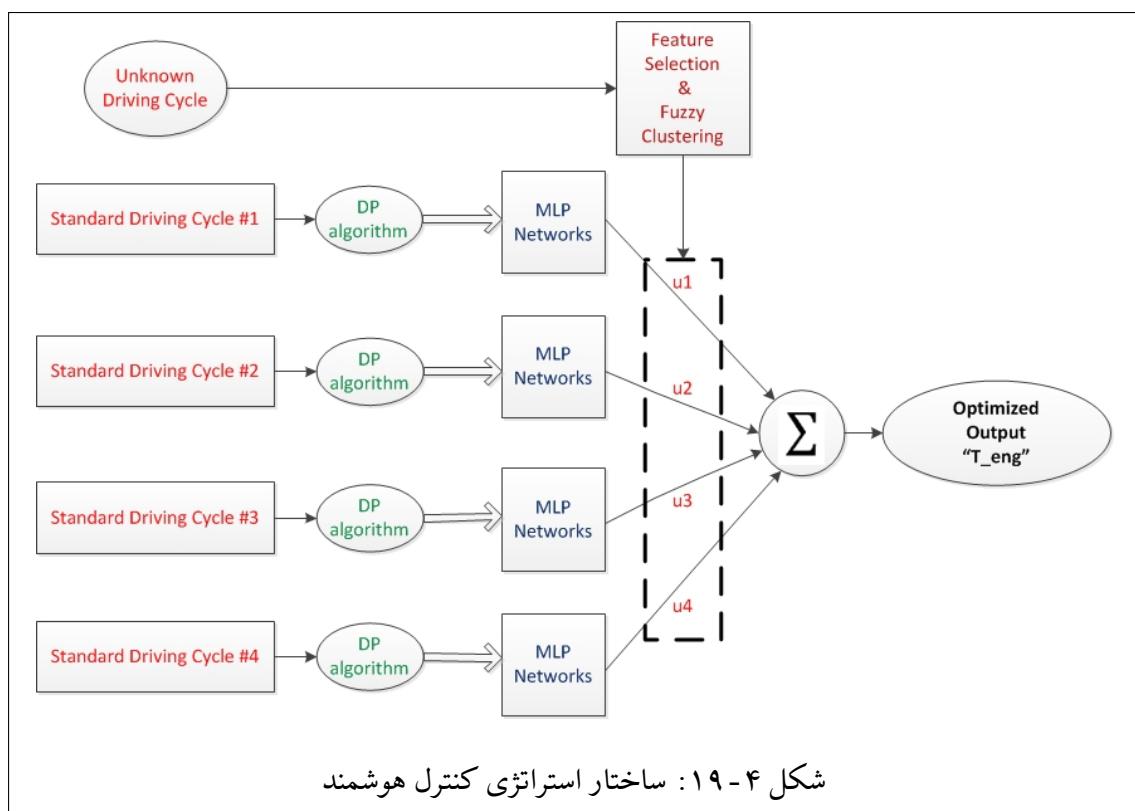
شکل ۴-۱۳ : ۱۶-۴ سیکل رانندگی نمونه



شکل ۱۷-۴ : محل قرارگیری مرکز خوشه‌ها و سیکل‌های رانندگی نمونه با استفاده از واحد شناسایی سیکل پیشنهادشده



شکل ۱۸-۴ : مقادیر ضرائب شباهت برای سیکل Local Road به عنوان ورودی در واحد شناسایی سیکل



فصل ۵

نتایج شبیه‌سازی‌ها

در این فصل، به منظور بررسی کیفیت طراحی قوای محرکه‌ی هیبرید و همچنین طراحی استراتژی کنترل هوشمند ارائه شده، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از ابزار حل ode45 در نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام گرفته است. گام زمانی انتخاب شده، ثابت و برابر با 0.01 s ثانیه می‌باشد. به منظور ایجاد امکان مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌ها بین اتوبوس متعارف و اتوبوس هیبرید، یک مدل برای اتوبوس متعارف ایجاد شده است. روند مدل‌سازی مشابه روند ارائه شده برای اتوبوس هیبرید می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها شامل مقایسه‌ی مقدار مصرف سوخت اتوبوس متعارف و اتوبوس هیبرید با دو استراتژی کنترل قانون‌مند و هوشمند می‌باشد. همچنین عملکرد شتاب‌گیری و شبیه‌پیمایی اتوبوس‌های متعارف و هیبرید به منظور بررسی تأثیر فناوری هیبرید بر عملکرد اتوبوس مقایسه شده‌اند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با درنظر گرفتن وزن اتوبوس به همراه 70 kg مسافر لحاظ شده است. علاوه‌بر این توانی معادل $7/5\text{ km/L}$ کیلووات به صورت ثابت به عنوان توان مصرفی مجموعه‌ی کمکی اتوبوس در هر لحظه به توان موردنیاز خودرو اضافه شده است. منظور از مجموعه‌ی کمکی اتوبوس، سیستم هوادهی، فرمان، روغن‌کاری و خنک‌کاری می‌باشد. در اتوبوس‌های متعارف و هیبرید، این مقدار توان بطور کامل توسط موتور احتراق‌داخلی تأمین می‌شود. تأمین توان موردنیاز مجموعه‌ی کمکی توسط انرژی ذخیره شده در آکومولاتورها، خاموش و روشن شدن متعدد موتور احتراق‌داخلی و بدنبال آن سوختن موتور را منجر می‌شود. مقدار توان مجموعه‌ی کمکی براساس اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران لحاظ شده است.

همان‌طورکه ذکر شد، کاهش مصرف سوخت در خودروهای هیبرید در صورتی قابل قبول است که عملکرد شبیه‌پیمایی و شتاب‌گیری اتوبوس نسبت به اتوبوس متعارف کاهش نیابد. در جداول ۱-۵ و ۲-۵ مقادیر قیود شتاب‌گیری برای اتوبوس‌های هیبرید هیدرولیک موازی و متعارف نشان داده شده است. توجه شود که نوع استراتژی کنترل تأثیری بر عملکرد اتوبوس ندارد و ظرفیت توان و گشتاور سیستم قوای محرکه ملاک است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، عملکرد شتاب‌گیری اتوبوس هیبرید هیدرولیک بهتر است که بدلیل افزایش توان سیستم قوای محرکه می‌باشد. در مقابل، بدلیل کاهش توان موتور احتراق‌داخلی و توجه به این امر که در شرایط پایدار، امکان استفاده از سیستم قوای محرکه‌ی هیدرولیک وجود ندارد (پایین بودن چگالی

جدول ۵-۱: نتایج مقایسه عملکرد شتاب‌گیری اتوبوس هیبرید و متعارف

| زمان شتاب‌گیری برای اتوبوس هیبرید (sec) | زمان شتاب‌گیری برای اتوبوس متعارف (sec) | بازه‌ی سرعت در شتاب‌گیری km/h |
|---|---|-------------------------------|
| ۱۸/۴۳ | ۱۸/۶ | ۶۵ - ۰ |
| ۳/۸۹ | ۳/۲۶ | ۲۵ - ۰ |
| ۲/۲۷ | ۲/۹۵ | ۳۵ - ۲۵ |
| ۱/۳۵ | ۱/۳۵ | ۴۰ - ۳۵ |
| ۱/۳۶ | ۱/۳۷ | ۴۴ - ۴۰ |

جدول ۵-۲: نتایج مقایسه عملکرد شیب‌پیمایی اتوبوس هیبرید و متعارف

| سرعت ثابت برای اتوبوس هیبرید (km/h) | سرعت ثابت برای اتوبوس متعارف (km/h) | مقدار شیب جاده (درصد) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| ۱۱۰/۵ | ۱۰۲/۷ | صفر |
| ۵۰/۳ | ۵۵/۳ | ۷ |
| ۳۸/۲ | ۴۰/۰ | ۱۰ |
| ۱۸/۸ | ۲۵/۱ | ۱۴ |

انرژی)، عملکرد شیب‌پیمایی اتوبوس هیبرید کاهش یافته است. البته عملکرد شیب‌پیمایی اتوبوس هیبرید هیدرولیک قابل قبول است. در واقع اتوبوس متعارف عملکردی بیشتر از استاندارد دارد. در جدول ۵-۵ مقادیر مصرف سوخت اتوبوس‌های متعارف و هیبرید در ۷ سیکل رانندگی مختلف ارائه شده است. این سیکل‌های رانندگی متعلق به حرکت اتوبوس‌های شهری در شهرهای مختلف جهان می‌باشند. بهمنظور کاهش تأثیر تغییرات سطح شارژ آکومولاتورها در مقدار مصرف سوخت اتوبوس هیبرید، نتایج این جدول برای ۵ دوره‌ی متوالی از هریک از سیکل‌های رانندگی ارائه شده است.

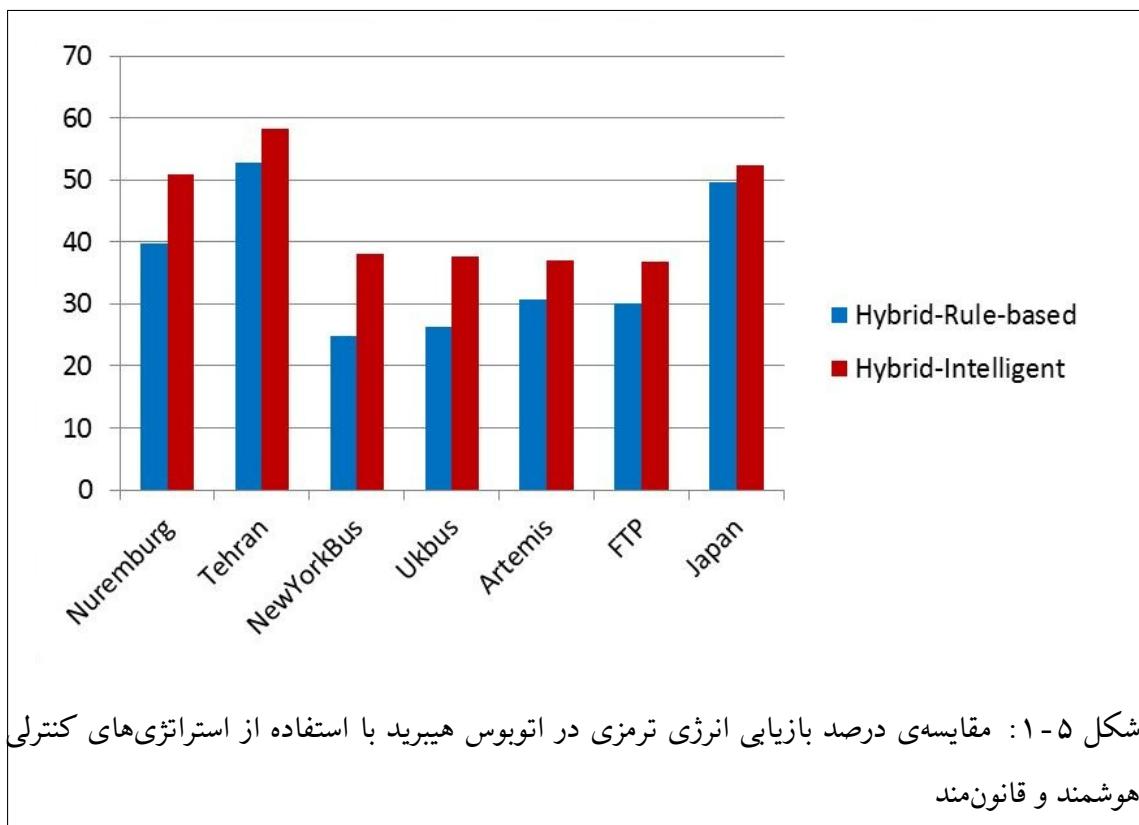
دلیل تأثیر بیشتر استراتژی کنترل هوشمند در کاهش مصرف سوخت اتوبوس را می‌توان در درصد بازیابی انرژی ترمیزی دید. درصد بازیابی انرژی ترمیزی برای اتوبوس متعارف و اتوبوس هیبرید با استراتژی‌های کنترلی قانونمند و هوشمند در ۷ سیکل رانندگی در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود بازیابی انرژی ترمیزی در اتوبوس هیبرید با استراتژی کنترل هوشمند بیشتر است. بازیابی بیشتر انرژی ترمیزی منجر به استفاده‌ی بیشتر از انرژی ذخیره‌شده در آکومولاتورها و بدنبال آن کاهش استفاده از انرژی موجود در گازوئیل می‌شود. همین امر کاهش مصرف سوخت اتوبوس را به همراه دارد. در شکل‌های ۲-۵

جدول ۵-۳: نتایج مقایسه‌ی مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف

| درصد کاهش نسبت به هیبرید- قانونمند | درصد کاهش نسبت به متعارف | MSE سرعت اتوبوس | مقدار مصرف سوخت اتوبوس lit/(100km) | نوع سیستم تولید و انتقال قدرت | سیکل رانندگی |
|---|-----------------------------------|-----------------------|---|-------------------------------------|----------------|
| - | - | ۰/۰۰۱۸ | ۷۳/۰۱ | متعارف | cyc nuremburg |
| - | ۲۹/۷۲ | ۰/۰۰۱۷ | ۵۱/۳۱ | هیبرید-قانونمند | cyc nuremburg |
| ۷/۲۹ | ۳۴/۸۵ | ۰/۰۰۲ | ۴۷/۵۷ | هیبرید-هوشمند | cyc nuremburg |
| - | - | ۰/۰۰۰۸ | ۶۹/۰ | متعارف | cyc tehran |
| - | ۳۲/۱۳ | ۰/۰۰۰۷ | ۴۶/۸۳ | هیبرید-قانونمند | cyc tehran |
| ۳/۲۱ | ۳۴/۳۰ | ۰/۰۰۰۷ | ۴۵/۳۳ | هیبرید-هوشمند | cyc tehran |
| - | - | ۰/۰۰۲۹ | ۱۲۲/۷ | متعارف | cyc NewYorkBus |
| - | ۲۱/۱۱ | ۰/۰۰۳ | ۹۶/۸۸ | هیبرید-قانونمند | cyc NewYorkBus |
| ۸/۱۳ | ۲۷/۵۲ | ۰/۰۰۴۴ | ۸۹/۰ | هیبرید-هوشمند | cyc NewYorkBus |
| - | - | ۰/۰۰۱۸ | ۷۲/۵۹ | متعارف | cyc Ukbus |
| - | ۲۳/۸۶ | ۰/۰۰۱۵ | ۵۵/۴ | هیبرید-قانونمند | cyc Ukbus |
| ۷/۲۲ | ۲۹/۳۶ | ۰/۰۰۱۷ | ۵۱/۴ | هیبرید-هوشمند | cyc Ukbus |

جدول ۵-۳: نتایج مقایسه‌ی مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و متعارف (ادامه)

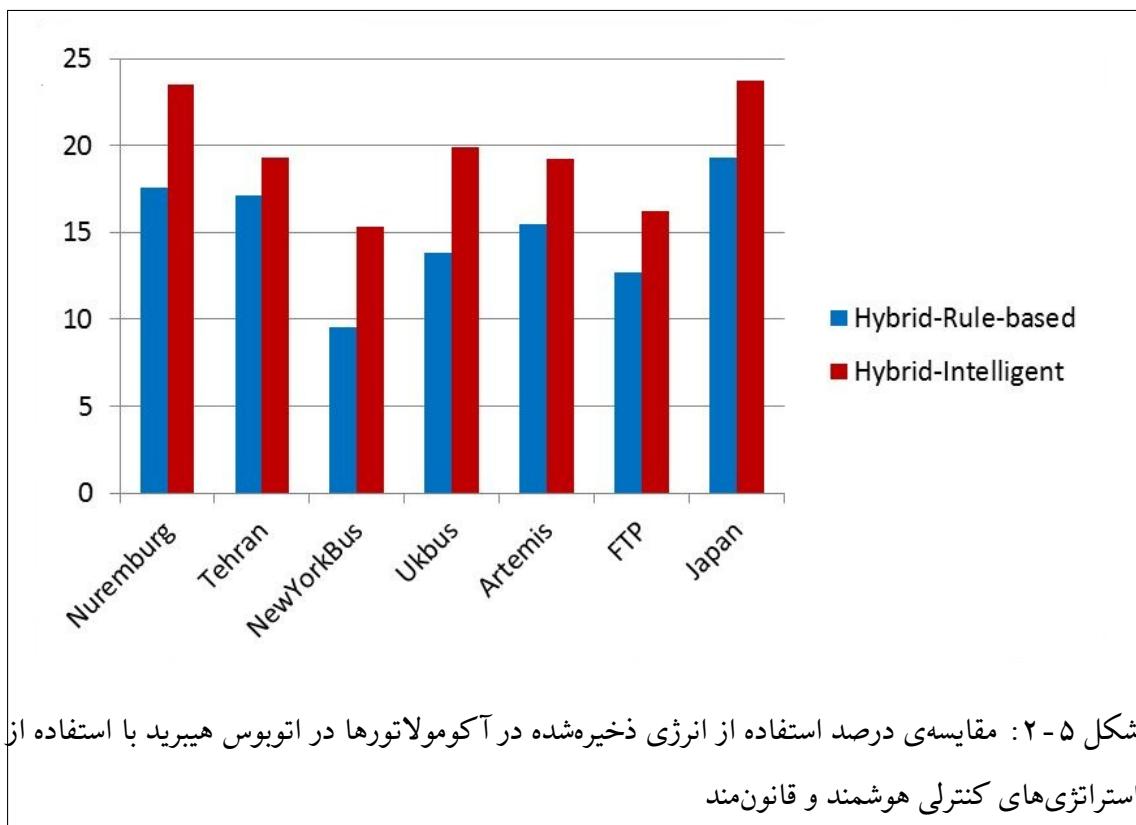
| درصد کاهش نسبت به هیبرید- قانونمند | درصد کاهش نسبت به متعارف | MSE سرعت اتوبوس | مقدار مصرف سوخت اتوبوس lit/(100km) | نوع سیستم تولید و انتقال قدرت | سیکل رانندگی |
|---|-----------------------------------|-----------------------|---|-------------------------------------|------------------|
| - | - | ۰/۰۰۳۶ | ۷۶/۹۸ | متعارف | cyc Artemis |
| - | ۲۶/۱۴ | ۰/۰۰۳۲ | ۵۶/۶۷ | هیبرید-قانونمند | cyc Artemis |
| ۵/۱۵ | ۳۰/۱۸ | ۰/۰۰۷۸ | ۵۳/۷۵ | هیبرید-هوشمند | cyc Artemis |
| - | - | ۰/۰۰۱۸ | ۵۳/۰۶ | متعارف | cyc FTP |
| - | ۲۶/۱۸ | ۰/۰۰۱۷ | ۳۹/۱۷ | هیبرید-قانونمند | cyc FTP |
| ۱/۶ | ۲۷/۳۵ | ۰/۰۰۲۳ | ۳۸/۵۵ | هیبرید-هوشمند | cyc FTP |
| - | - | ۰/۰۰۱۲ | ۶۳/۱۶ | متعارف | cyc japanmidtown |
| - | ۳۲/۶۵ | ۰/۰۰۱۲ | ۴۲/۵۴ | هیبرید-قانونمند | cyc japanmidtown |
| ۵/۴۸ | ۳۶/۳۷ | ۰/۰۰۱۲ | ۴۰/۲۱ | هیبرید-هوشمند | cyc japanmidtown |



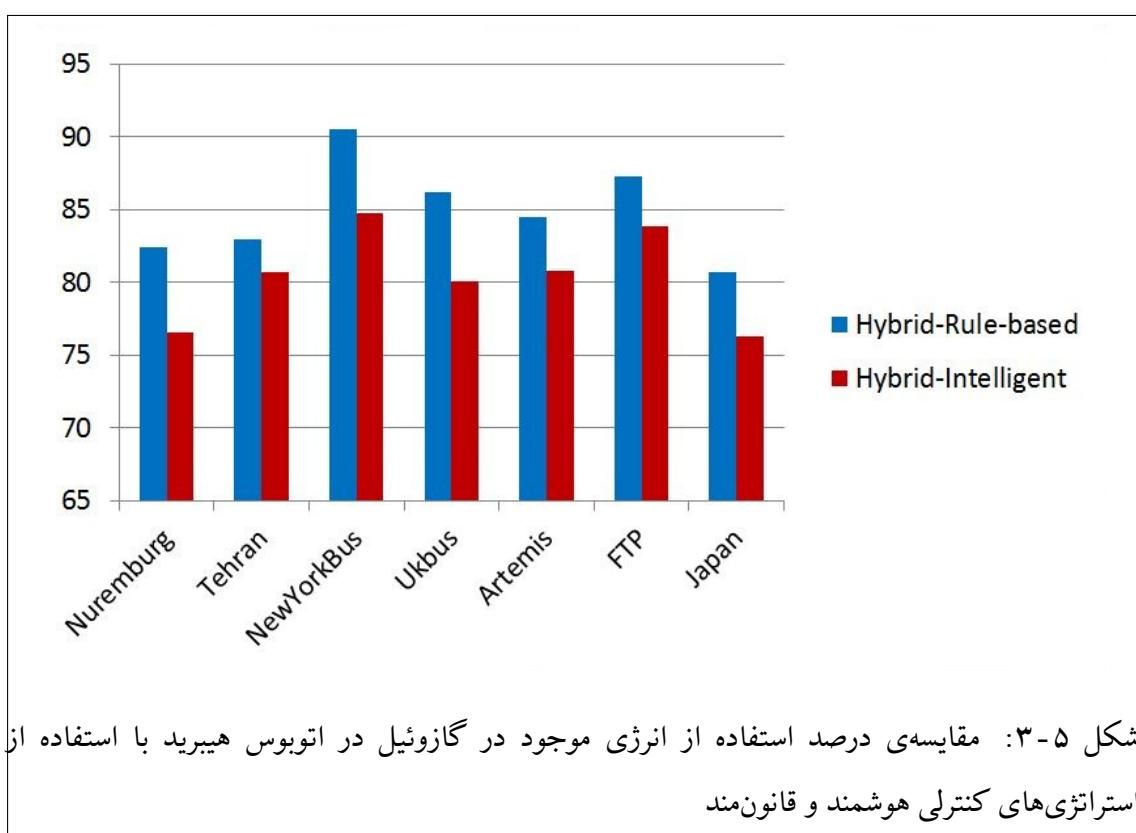
شکل ۵ - ۱ : مقایسه‌ی درصد بازیابی انرژی ترمی در اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی‌های کنترلی هوشمند و قانونمند

و ۳-۵ مقایسه‌ای میان درصد استفاده از انرژی ذخیره شده در آکومولاتورها و همچنین درصد استفاده از انرژی موجود در گازوئیل به منظور تأمین انرژی موردنیاز خودرو در ۷ سیکل رانندگی برای اتوبوس هیبرید ارائه شده است. در محاسبه‌ی این درصدها، افت‌های موجود در سیستم تولید و انتقال قدرت در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که با استفاده از استراتژی کنترل هوشمند، انرژی ذخیره شده در آکومولاتورها بیشتر و انرژی موجود در گازوئیل کمتر مورد استفاده قرار گرفته است.

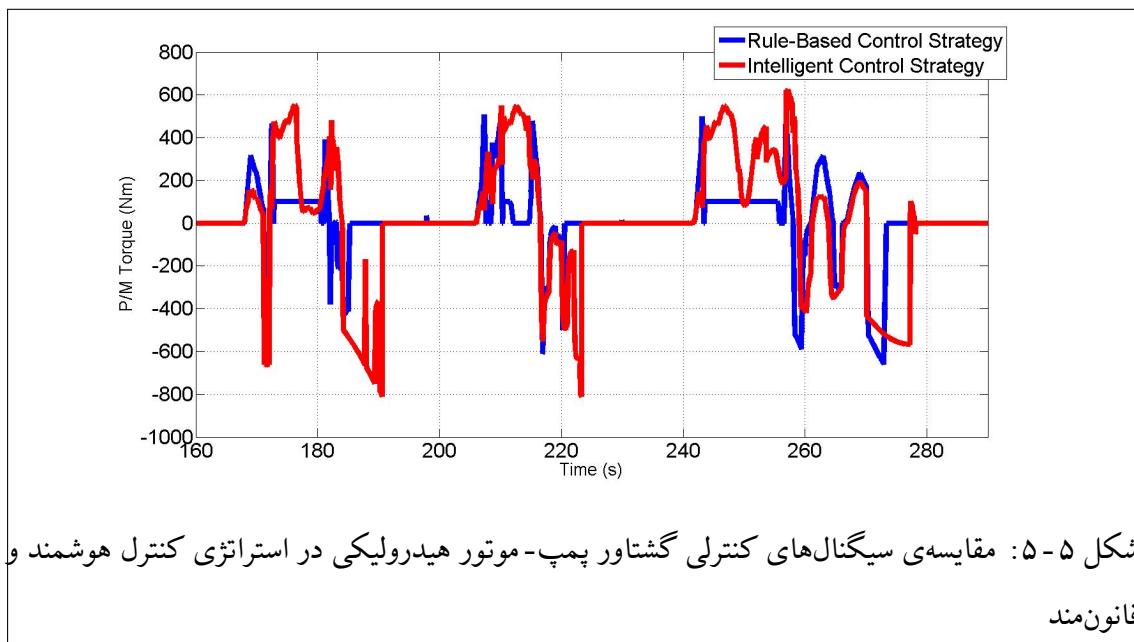
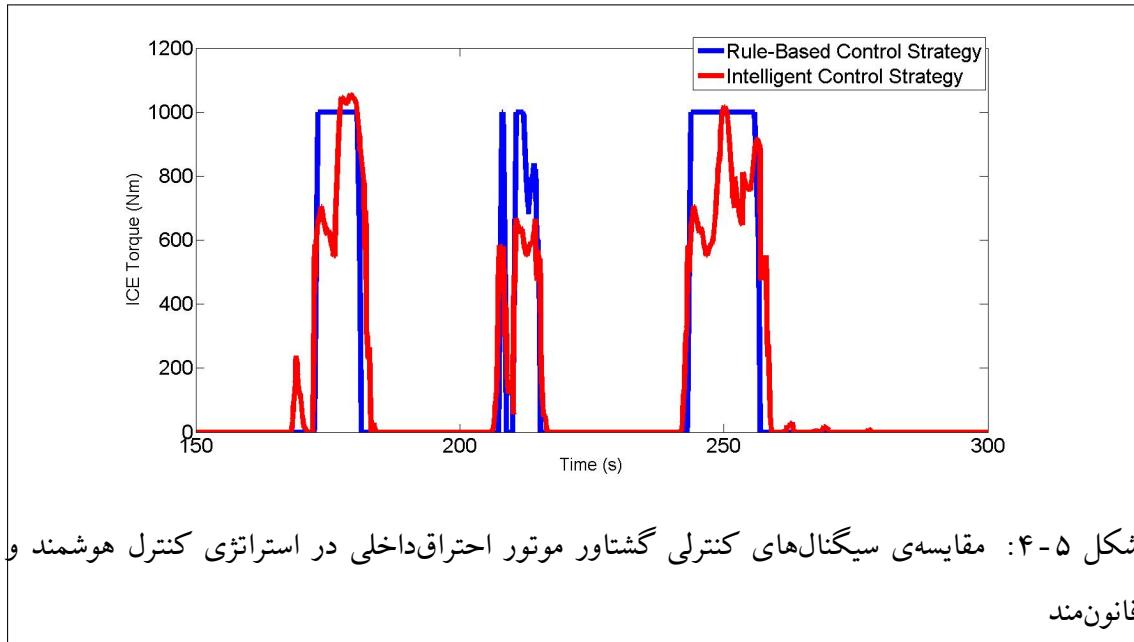
در پایان سیگنال‌های کنترلی با استفاده از استراتژی کنترل‌های قانونمند و فازی برای شبیه‌سازی اتوبوس هیبرید هیدرولیک در سیکل رانندگی *cycNewYorkBus* در شکل‌های ۴-۵ و ۵-۵ ارائه شده است. برایوضوح بیشتر، این سیگنال‌ها در یک بازه‌ی ۱۵۰ ثانیه‌ای ارائه شده است. با توجه به این دو شکل نیز مشاهده می‌شود که با استفاده از استراتژی کنترل هوشمند، استفاده بیشتری از پمپ-موتور هیدرولیکی و بدنبال آن بازیابی بیشتر انرژی ترمی صورت گرفته است.



شکل ۵ - ۲: مقایسه درصد استفاده از انرژی ذخیره شده در آکومولاتورها در اتوبوس های هیبرید با استفاده از استراتژی های کنترلی هوشمند و قانون مند



شکل ۵ - ۳: مقایسه درصد استفاده از انرژی موجود در گازوئیل در اتوبوس های هیبرید با استفاده از استراتژی های کنترلی هوشمند و قانون مند



فصل ۶

جمع‌بندی و تحقیقات آتی

در سال‌های اخیر فناوری هیبرید در سیستم‌های تولید و انتقال قدرت، به عنوان یک راهکار مناسب جهت کاهش مصرف سوخت و کاهش تولید آلاینده‌ها در حوزه‌ی حمل و نقل مدنظر قرار گرفته است. در این حوزه، اجرای فناوری هیبرید روی ناوگان حمل و نقل عمومی شامل اتوبوس‌ها، تامسی‌ها و قطارهای شهری، بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف سوخت خواهد داشت. مانع اصلی بر سر راه استفاده از فناوری هیبرید در وسائل نقلیه، افزایش هزینه‌ی تولید انبوه نمونه‌ی هیبرید نسبت به نوع متعارف است.

در این پایان‌نامه، یک اتوبوس شهری به عنوان خودروی پایه انتخاب و سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک برای آن طراحی و مدل‌سازی شده است. هیبرید هیدرولیک نسبت به نوع معروف‌تر قوای محرکه‌ی هیبرید، هیبرید الکتریک، ارزان‌تر است و پیچیدگی‌های طراحی و ساخت آن کمتر می‌باشد. در ابتدا، طراحی قوای محرکه با درنظر گرفتن روابط دینامیک خودرو و همچنین قیود عملکردی مناسب برای یک اتوبوس شهری انجام گرفته است. در مرحله‌ی طراحی مقدار توان موردنیاز موتور احتراق‌داخلی و پمپ- موتور هیدرولیک به عنوان المان‌های تولید قدرت تعیین شده است.

در مرحله‌ی مدل‌سازی، سعی بر آن بوده است که تمامی اطلاعات موجود در مورد بازدهی ادوات مختلف سیستم، مدنظر قرار گیرد. بازدهی ادوات مختلف با استفاده از اطلاعات موجود در کاتالوگ و به کمک جداول جستجو در نرم‌افزار مدل شده است. در پایان بخش مدل‌سازی، مدل المان‌های موجود در سیستم قوای محرکه براساس اطلاعات ارائه شده در کاتالوگ‌های هریک تأیید صحت شده است. این روش تأیید صحت بدلیل عدم امکان ساخت و تست عملی المان‌های سیستم، انتخاب شده است.

استراتژی کنترل مهمترین بخش یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید می‌باشد. در پایان‌نامه‌ی حاضر پس از ارائه‌ی طراحی و مدل‌سازی صورت گرفته، روند طراحی یک استراتژی کنترل هوشمند ارائه شده است. هوشمندی این استراتژی کنترل از آن جهت است که با توجه به مشخصات ترافیکی هر سیکل، سیگنال کنترلی مناسب را ایجاد و ارسال می‌نماید. اساس استراتژی کنترل هوشمند ارائه شده بر چهار استراتژی کنترل بهینه، متناظر با چهار سیکل رانندگی استاندارد، و همچنین شناسایی سیکل رانندگی است. در واحد شناسایی سیکل، براساس اطلاعات ترافیکی در طول مدت زمان گذشته از سیکل رانندگی، مقادیر درجات شباهت

سیکل رانندگی موردنظر به چهار سیکل استاندارد تعیین می‌گردد. سیگنال کنترلی از ترکیب خطی خروجی کنترلهای بهینه مربوط به ۴ سیکل رانندگی استاندارد که با درجات شباهت متناظر وزن دهی شده‌اند، بدست می‌آید. سیگنال طراحی شده در هر ثانیه از سیکل رانندگی به‌روز می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که استراتژی کنترل هوشمند نسبت به استراتژی کنترل قانون‌مند مصرف سوخت اتوبوس در سیکل‌های رانندگی مختلف را کاهش داده است. این درصد کاهش مصرف سوخت نسبی، بیانگر این امر است که استراتژی کنترل قانون‌مند برای بعضی از سیکل‌ها مناسب و برای بعضی دیگر نامناسب است. کاهش مصرف سوخت بیشتر با استفاده از استراتژی کنترل هوشمند، ناشی از بازیابی بیشتر انرژی ترمزی و بدنبال آن استفاده‌ی کمتر از انرژی گازوئیل است.

به‌منظور ادامه‌ی تحقیقات انجام گرفته در این پایان‌نامه، فعالیت‌های مختلفی در هر دو زمینه‌ی طراحی و مدل‌سازی سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک و طراحی استراتژی کنترل پیشنهاد می‌گردد:

- انجام تست‌های عملی و تأیید صحت مدل‌های ادوات مختلف در سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک با استفاده از نتایج واقعی. تأیید صحت مدل سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس با استفاده از نتایج تست‌های عملی المان‌های مختلف، یک تحقیق لازم جهت تأیید نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. تست‌های عملی باستی به صورت سخت‌افزار - در مدار^۱ انجام گیرد. موانع موجود بر سر راه این پروژه، بالا بودن هزینه‌های مالی تأمین قطعات سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید و همچنین آماده‌سازی سیستم تست برای هر المان می‌باشد. با آماده‌سازی سیستم‌های تست، امکان تأیید صحت نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به استراتژی کنترل هوشمند نیز وجود دارد.

- مدل‌سازی کامل مدارات هیدرولیک. در این پایان‌نامه، تنها پمپ-موتور هیدرولیکی و آکومولاتور که در نحوه‌ی عملکرد سیستم قوای محرکه هیبرید هیدرولیک نقش اساسی دارند، مدل‌سازی شده‌اند. به عنوان یک فعالیت تکمیلی می‌توان پس از طراحی مدارات هیدرولیک مجموعه‌ی قوای محرکه، یک مدل در نرم‌افزاری مانند Automation Studio شامل شیرهای هیدرولیکی، فیلترها و لوله‌ها ایجاد کرد. با انجام این نوع مدل‌سازی و اعمال بازده تک‌تک المان‌های مدار هیدرولیک، مدل ایجاد شده به سیستم واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. برای ایجاد مدل مذکور، امکان استفاده از محیط MATLAB در نرم‌افزار SimHydraulic نیز وجود دارد.

- استفاده از اطلاعات سیکل رانندگی پیش‌رو با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) به‌منظور طراحی استراتژی کنترل هوشمند. در این پایان‌نامه، با استفاده از اطلاعات ترافیکی گذشته‌ی سیکل رانندگی، ماهیت سیکل شناسایی و برای یک مدت زمان معین در آینده‌ی سیکل، تصمیم کنترلی استخراج شده است. در سال‌های اخیر در حوزه‌ی استراتژی کنترل سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید تحقیقاتی انجام شده است که در آنها با استفاده از سیستم‌های GIS، آینده‌ی ترافیکی سیکل مشاهده می‌شود [۴۷]. سپس براساس هر شرایط ترافیکی خاص، استراتژی کنترل مناسب اتخاذ می‌شود. با توجه به جدید بودن این ایده، زمینه‌ی فعالیت در این حوزه فراهم است. لازمه‌ی انجام پروژه‌ی مذکور، دسترسی به اطلاعات آینده‌ی سیکل با استفاده از ابزارهایی مانند GPS می‌باشد.

^۱Hardware-in-the-Loop

^۲Geographical Information System

- لحاظ نمودن قابلیت رانندگی در طراحی استراتژی کنترل هوشمند. منظور اضافه نمودن واحدی در کنترلر مرکزی هیرید است که در آن فرکانس گشتاور درخواستی از موتور احتراق داخلی و همچنین فرکانس تعویض دنده‌ی گیربکس محدود گردد. رعایت نمودن این قید، علاوه بر نزدیک شدن مدل‌سازی به واقعیت اتوبوس، موجب نرم‌شدن کارکرد سیستم تولید و انتقال قدرت اتوبوس می‌شود. در سال‌های اخیر در این زمینه تحقیقاتی نیز انجام شده است [۲۵].
- استفاده از توابع متعامد به منظور شناسایی مدل خودرو و طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مرتبه‌ی دو^۳. در پایان‌نامه‌ی حاضر، مجموعه‌ای از روابط ریاضی دینامیک خودرو و همچنین اطلاعات موجود در کاتالوگ ادوات مختلف به منظور مدل‌سازی سیستم قوای محركه‌ی هیرید هیدرولیک استفاده شده است. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه‌ی استفاده از توابع متعامد مانند توابع لزاندر، چی‌شف و موجک^۴ جهت مدل‌سازی سیستم تولید و انتقال قدرت خودرو انجام شده است [۲۳]. با تعیین مدل اتوبوس به صورت مجموعه‌ای از توابع ریاضی، امکان طراحی کنترلر بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی مرتبه‌ی دو وجود خواهد داشت.
- شناسایی سیکل رانندگی با استفاده از توابع موجک متفاوت. می‌توان به جای استفاده از مشخصات ترافیکی سیکل رانندگی، از چندین تابع موجک که هریک نماینده‌ی یک فرکانس حرکتی خاص است، استفاده نمود. به عبارت دیگر شناسایی سیکل را براساس فرکانس تغییرات سرعت خودرو در طول سیکل رانندگی انجام داد. این ایده نیز در تحقیقات سال‌های اخیر موردن توجه قرار گرفته است [۴۸].

^۳Quadratic Programming

^۴Wavelet

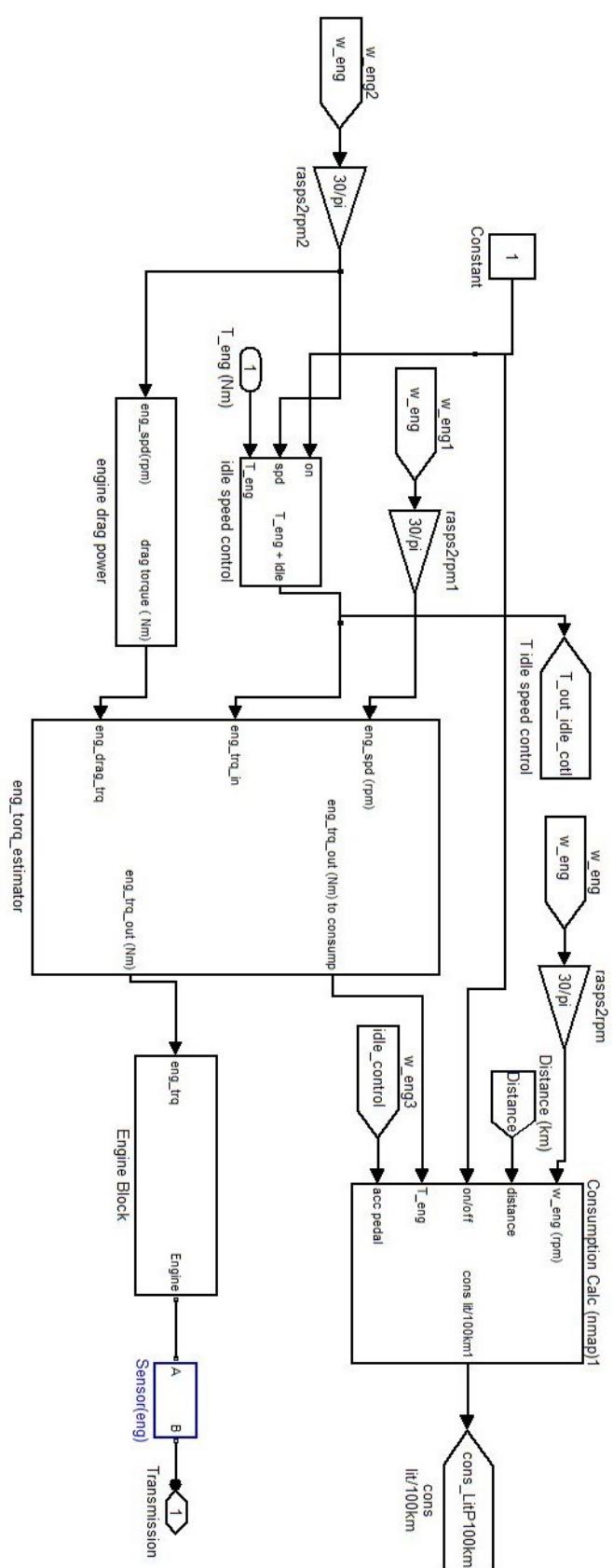
پیوست الف

بلوک‌های مربوط به مدل اتوبوس هیبرید

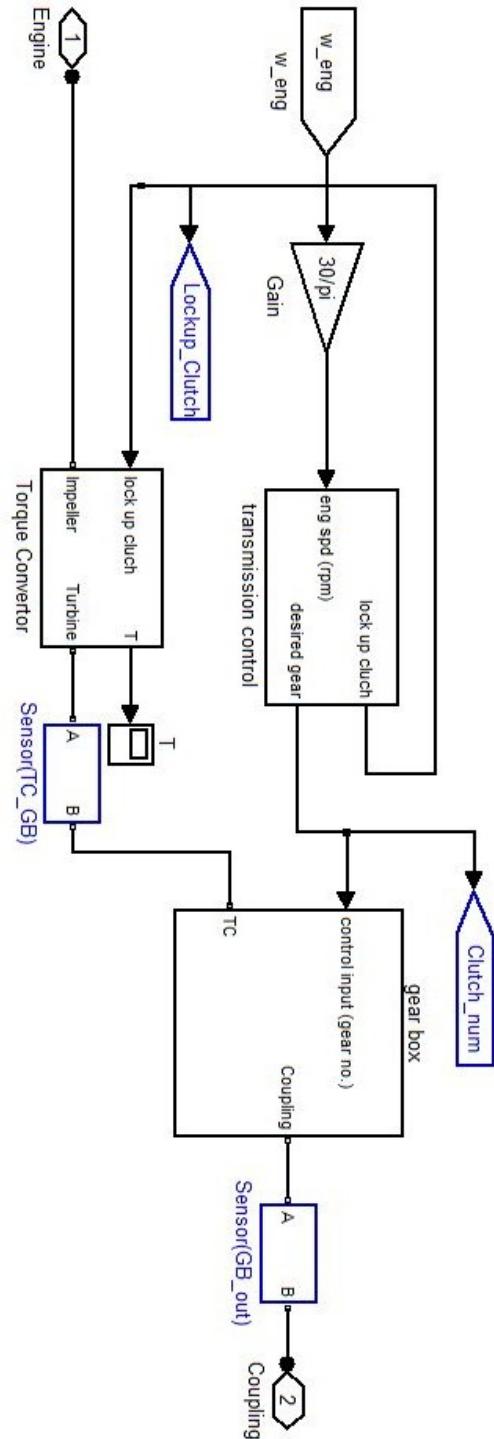
هیدرولیک موازی در نرم‌افزار

MATLAB/Simulink

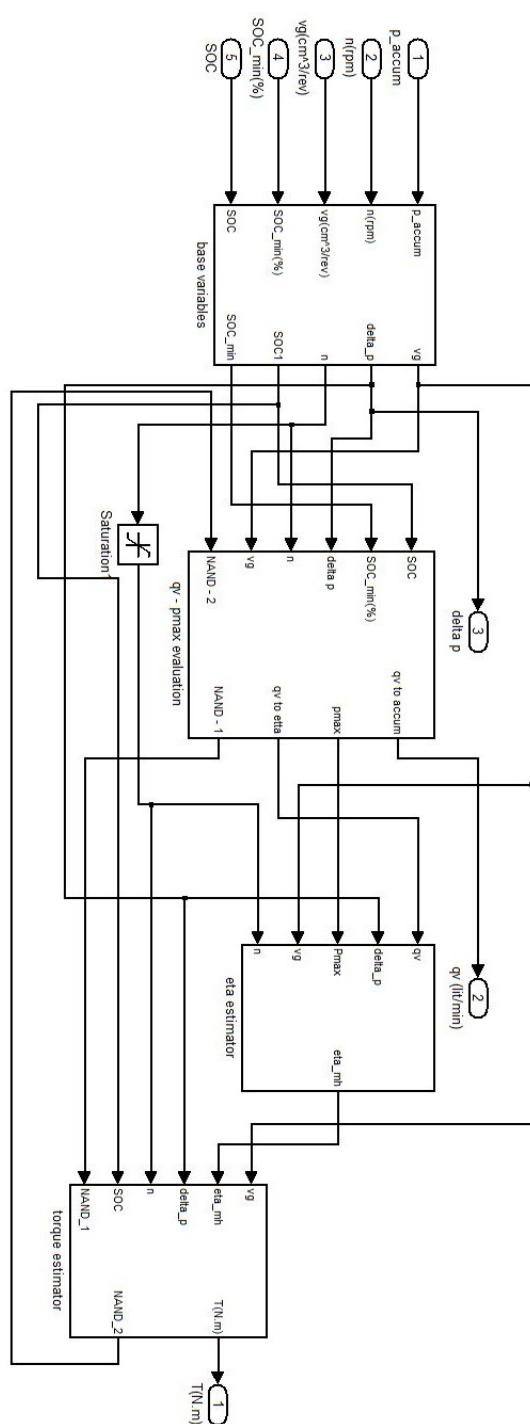
۸۹ بلوک‌های مربوط به مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink



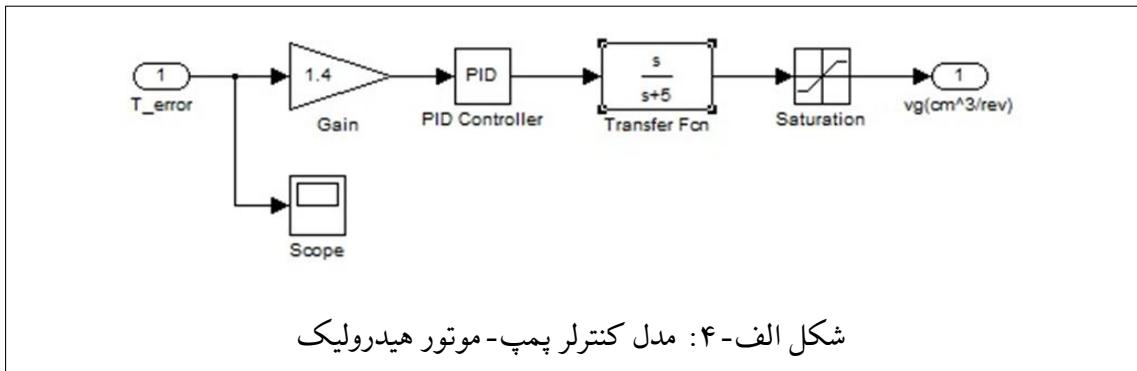
شکل الف-۱: مدل موتور احتراق داخلی



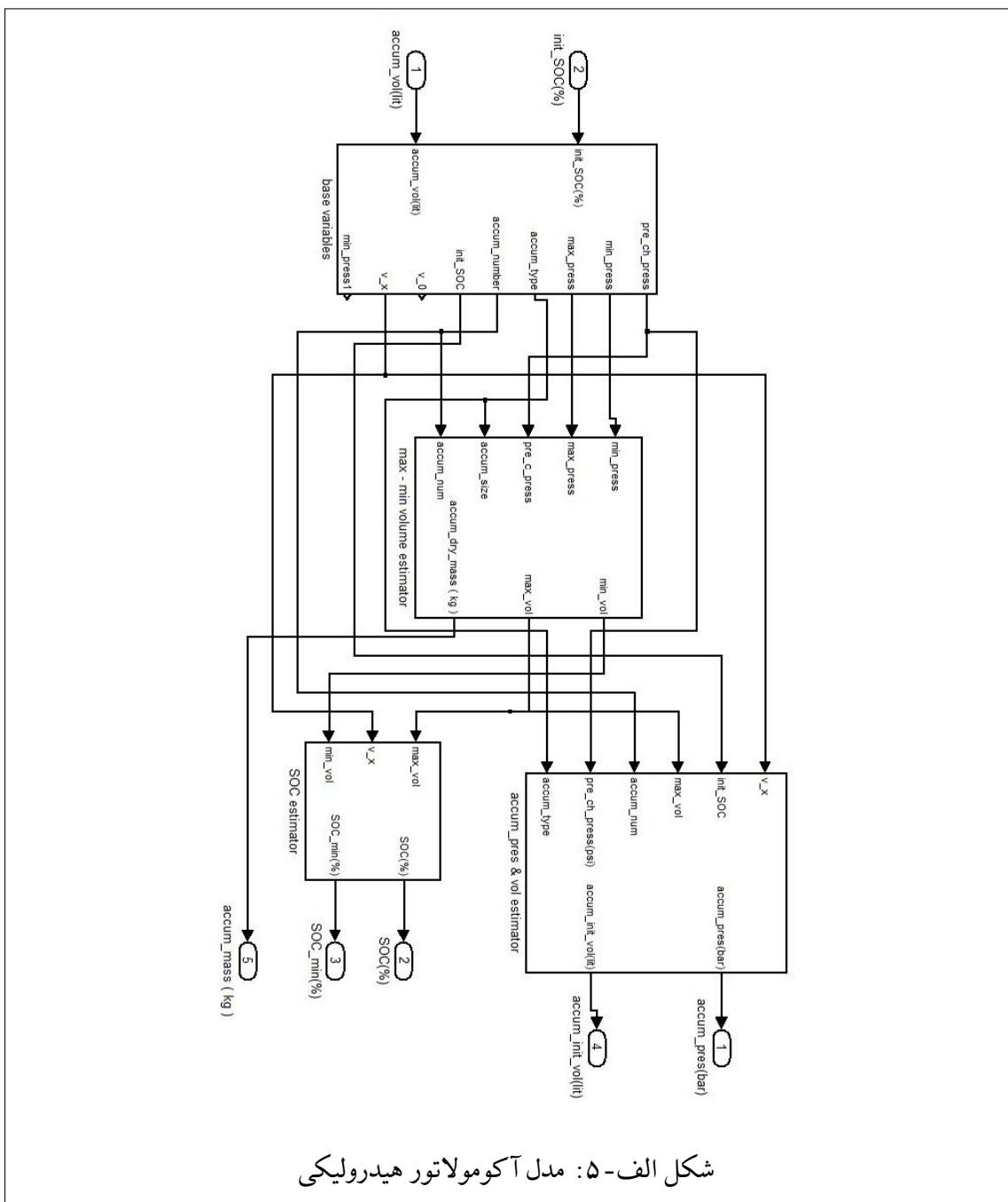
شکل الف-۲: مدل گیریکس اتوماتیک



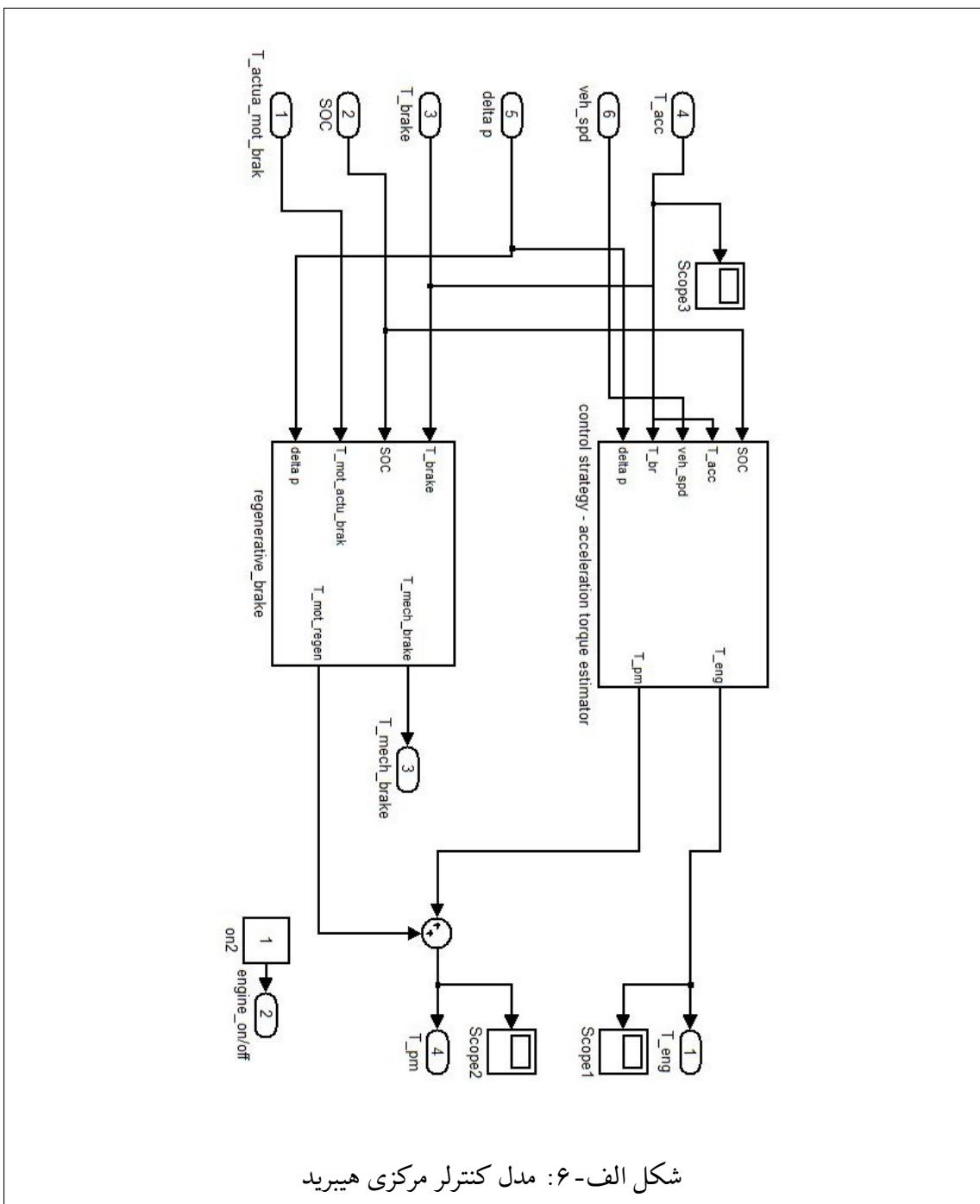
شکل الف-۳: مدل پمپ-موتور هیدرولیک



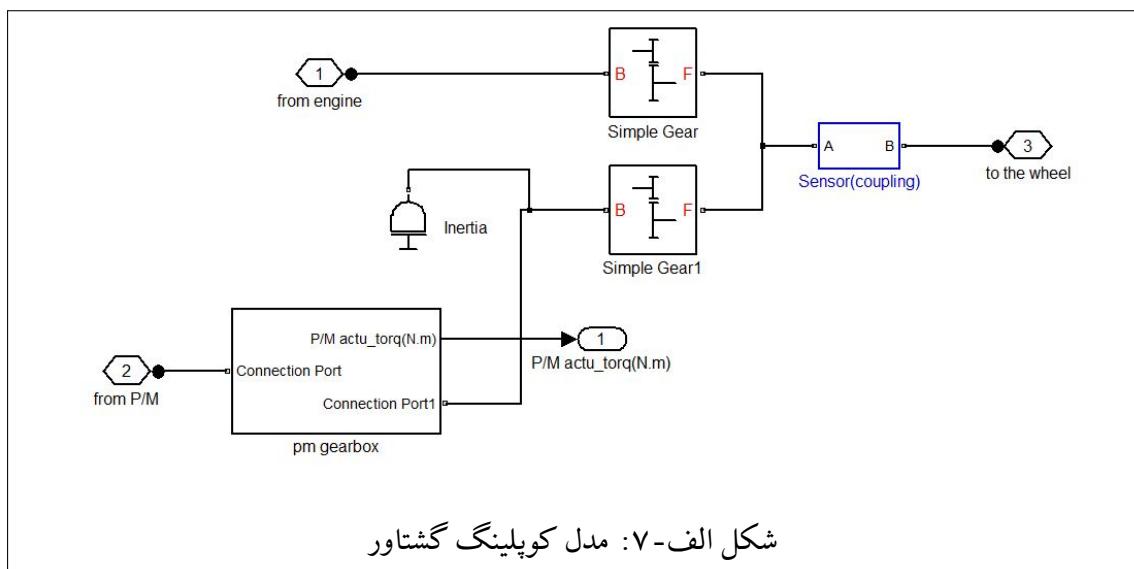
شکل الف-۴: مدل کنترلر پمپ-موتور هیدرولیک

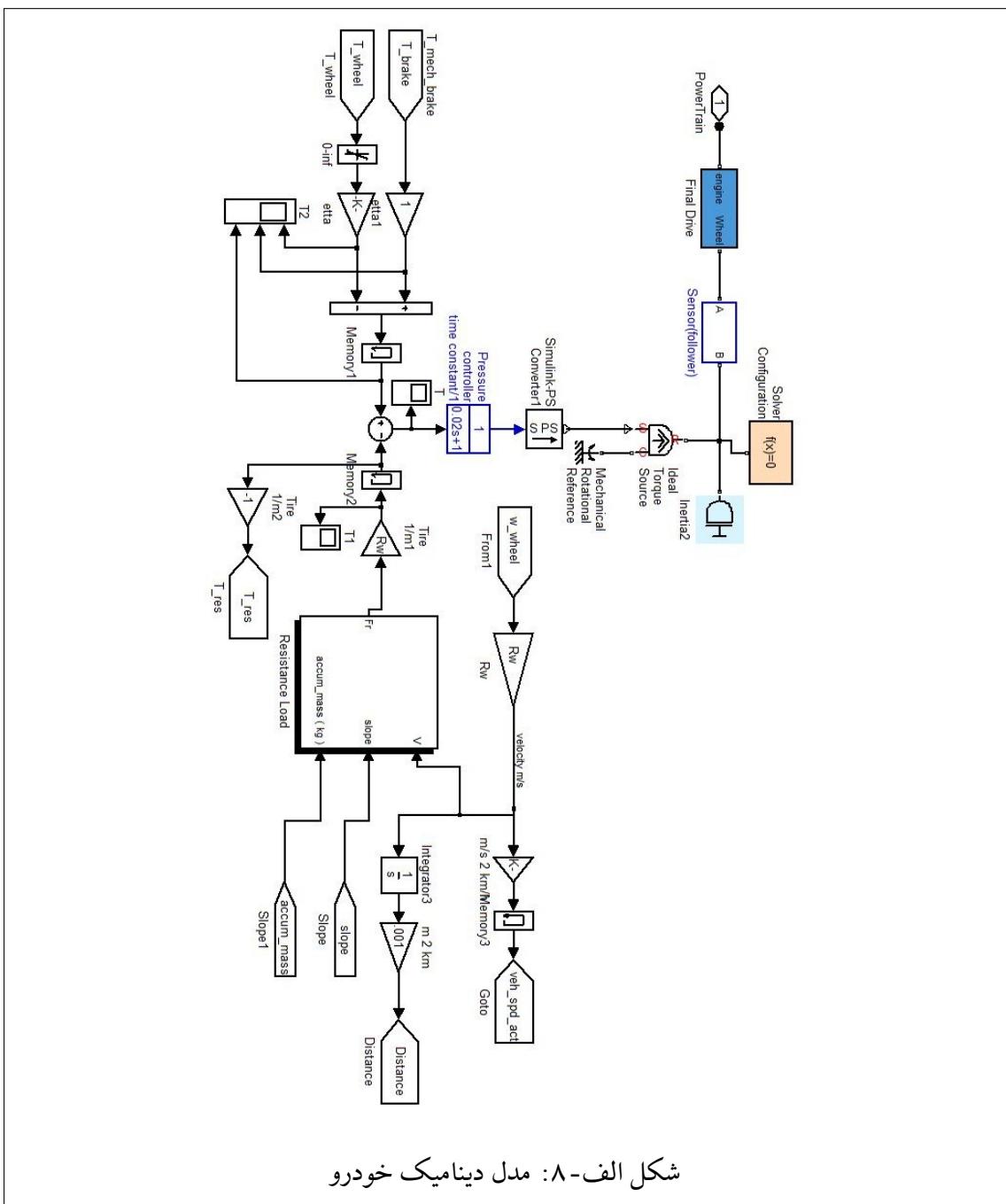


شکل الف-۵: مدل آکومولاتور هیدرولیکی



شکل الف-۶: مدل کنترلر مرکزی هیبرید





مراجع

- [1] Kim, Y. J. *Integrated modeling and hardware-in-the-loop study for systematic evaluation of hydraulic hybrid propulsion options*. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan, USA ,2008 . [٢](#), [٣](#), [٤](#), [٥](#)
- [2] Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design*. CRC Press, 2009. [١](#), [٢](#), [١٣](#), [١٤](#), [١٦](#)
- [3] Elder, F. T., and D. R. Otis. *Simulation of a hydraulic hybrid vehicle powertrain*. ASME, 73ICT50, 1973. [٣](#)
- [4] Wilson, W. E. *Positive-displacement pumps and fluid motors*. Sir Isaac Pitman and Sons, LTD, London, 1950. [٤](#)
- [5] Buchwald, P., Christensen, G., Larsen, H. and Pedersen, P. S. *Improvement of city bus fuel economy using a hydraulic hybrid propulsion system – A theoretical and experimental study*. SAE paper 790305, 1979. [٤](#)
- [6] Beachley, N. H. *Hydromechanical transmission saves fuel*. Hydraulics and Pneumatics, 73 76, 1981. [٤](#)
- [7] Reddy, S. C., and Rayudu, G. V. N. *Design of a regenerative braking system for city buses*. SAE paper 892529, 1989. [٤](#)
- [8] Stecki, J., and Matheson, P. *Advances in automotive hydraulic hybrid drives*. Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, Tsukuba, Japan, 2005. [٥](#)
- [9] Durali, M. and Sharafian, R. *Design and Performance Evaluation of a Turbo Hydraulic Bus*. (SAE-04FFL-84) JSAE/SAE 2004, Tokyo, Japan, August 2004. [٥](#)

- [10] Shan, M. *Modeling and Control Strategy for Series Hydraulic Hybrid Vehicles*. The University of Toledo, Canada, 2009. 5
- [11] Molla, S. K. *System Modeling and Power Management Strategy for a Series Hydraulic Hybrid Vehicle*. Clemson University, USA, 2010. 5
- [12] Yan, Y., Liu, G. and Chen, J. *Integrated Modeling and Optimization of a Parallel Hydraulic Hybrid Bus*. International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 97–104, 2010. 5
- [13] Wu, P., Luo, N., Fronczak, F. J. and Beachley, N. H. *Fuel economy and operating characteristics of a hydropneumatic energy storage automobile*. SAE paper 851678, 1985. 5
- [14] Kapellen, D. R., Jarnzadeh, F., Frank, A. A. and Wang, S. *Analysis of energy storage concepts for refuse collection trucks*. SAE paper 840056, 1984. 5
- [15] Martini, S. *The M.A.N. hydrobus: A drive concept with hydrostatic brake energy recovery*. International Symposium on Advanced and Hybrid Vehicles, 1984. 6
- [16] Nakazawa, N., Kono, Y., Takao, E. and Takeda, N. *Development of a braking energy regeneration system for city buses*. SAE paper 872265, 1987. 6
- [17] Davies, A. S. *The reduction of city bus exhaust emissions by means of a regenerative powertrain*. SAE paper 890267, 1989. 6
- [18] Hugosson, C. *Cumulo hydrostatic drive – A vehicle drive with secondary control*. Third Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linkoping, Sweden, 1993. 6
- [19] Pawelski, Z. *Modeling and Design of Hydrobus*. Technical University of Lodz, Poland, 2000. 6
- [20] Kepner, R.P. *Hydraulic power assist - a demonstration of hydraulic hybrid vehicle regenerative braking in a road vehicle application*. SAE Paper 2002-01-3128, 2002. 6
- [21] Hui, S., Ji-hai, J. and Xin, W. *Torque Control Strategy for a Parallel Hydraulic Hybrid Vehicle*. Journal of Terramechanics 46, pp. 259-265, 2009. 6
- [22] Rajaei Salmasi, F. *Control Strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends*. IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 56, NO. 5, September 2007. 6, 7

[23] Dosthosseini R., Kouzani A. Z. and Sheikholeslam F. *Direct Method for Optimal Power Management in Hybrid Electric Vehicles*. International Journal of Automotive technology, Vol. 12, NO. 6, 943-950, 2011. 6, 87

[24] Won, J. S. *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle*. Texas AM University, 2003. چ, 7, 56

[25] Opila D. F, Aswani D., McGree R., Cook J. A. and Grizzle J. W. *Incorporating Drivability Metreces into Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Vehicles*. Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008. 7, 87

[26] Murphey, Y. L., Chen, Z. H., Kiliaris, L., Park, J., Kuang, M., Masrur, A. and Phillips, A. *Neural Learning of Driving Environment Prediction for Vehicle Power Management*. International Joint Conference on Neural Networks, 2008. 7

[27] Abdollahi, A. D., Nikravesh, S.K., Menhaj, M.B. *An Intelligent Control Strategy in a Parallel Hybrid Vehicle*. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.4 – No.2 – Fall and Winter 2007. 7, 65

[28] Tian Y., Zhang X., Zhang L., Zhang X. *Intelligent Energy Management Based on Driving Cycle Identification Using Fuzzy Neural Network*. Second International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2009. 7

[29] Huang. X., Tan. Y. and He, X. *An Intelligent Multifeature Statistical Approach for the Discrimination of Driving Conditions of a Hybrid Electric Vehicle*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010. 7

[۳۰] عباس فتوحی، کاربرد اطلاعات ترافیکی و رانندگی در کنترل هوشمند خودروی هیبرید برقی، رساله دکتری در رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی، استاد راهنما: دکتر مرتضی منتظری، دانشگاه علم و صنعت، مهر ۱۳۹۰.

8

[31] Mercedes-Benz.

textitMersedes-Benz, OM 906 LA, 205 kW/279 hp Specifications. 2004. چ, 24

[32] Mercedes-Benz.

textitMersedes-Benz, Engin Brake -/ Drag Power, OM 906 LA. 2004. چ, 25

[33] ZF-Group.

textitZF-4HP590 Gearbox Specification. 2006. چ, 26

- [34] Rexroth Bosch-Group.
textit{Axial Piston Variable Pump}, A4VSO, Data Sheet. 2009. ۱۵, ۲۹
- [35] Rexroth Bosch-Group.
textit{Bladder-Type Accumulators}, Model HAB, Data Sheet. 2010. ۱۶, ۳۲
- [36] Seinfeld, J.H. and Lapidus, L. *Aspects of the Forward Dynamic Programming Algorithm*. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 7 (1968), 475-478. ۴۹, ۵۰
- [37] Bellman, R. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, N. J., 1957. ۴۹
- [38] Kirk, D.E. *Optimal Control Theory, An Introduction*. Dover Publications, Inc., 1970. ۴۹
- [39] Dreyfus, S. E. *Dynamic Programming and Calculus of Variations*. Academic Press, New York 1965. ۵۰
- [40] Won,J-S *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle*. PH.D Dissertation, Texas AM University, 2003. ۵۶
- [41] Ericson, E. *Independent Driving Pattern Factors and Their Influence on Fuel-use and Exhaust Emission Factors*. Transp. Res., Part D, 6(5), 325-341, 2001. ۶۵
- [42] Langari, R. and Won, J-S. *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle-Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process*. IEEE Transaction on Vehicular technology, 54(3), 925-934, 2005. ۶۵
- [43] Langari, R. and Won, J-S. *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle-Part II: Torque Distribution, Charge Sustance Strategies, and Performance Results*. Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process. IEEE Transaction on Vehicular technology, 54(3), 935-952, 2005.
- [44] Montazeri-GH, M., Fotouhi, A. and Naderpour, A. *Driving Pattern Clustering based on driving feature analysis*. Proc. IMechE, Vol. 225, Part C: Mechanical Engineering Science, 1301-1317, October 2010. ۶۵
- [45] Montazeri-GH and M., Fotouhi, A. *Traffic Condition Recognition Using the K-means Clustering Method*. Scientica Iranica B (2011), 18 (4), 930-937, 2011. ۶۶
- [46] Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. *Patterrn Recognition*. Elsevier (USA), 2006. ۶۸, ۶۹

- [47] Gong Q., Li Y. and Peng Z. R. *Trip-Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, NO. 6, November 2008. 86
- [48] Zhang X., Mi C. C., Masrur A. and Daniszewski D. *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, 1533-1543, 2008. 87

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی

A

Accumulator

انباره

Auxilary System

مجموعه‌ی کمکی

B

Bosch-Rexroth

شرکت بوش- رکسروت

Bladder

دیافراگمی

Backward

روبه‌عقب

Backward Dynamic Programming

برنامه‌ریزی دینامیکی رو به عقب

Forward Dynamic Programming

برنامه‌ریزی دینامیکی رو به جلو

C

Classifier

دسته‌بندی کننده

D

| | |
|---------------------|----------------------|
| Dynamic Programming | برنامه‌ریزی دینامیکی |
| Driveability | قابلیت رانندگی |
| Driving Cycle | سیکل رانندگی |
| Discretization | گسسته‌سازی |

E

| | |
|--------------------|--------------------|
| Electric Hybrid | هیبرید الکتریکی |
| Electric Motor | موتور الکتریکی |
| Engine Drag Torque | گشتاور مقاوم موتور |
| Effective Mass | جرم مؤثر |
| Exhaustive Search | جستجوی جامع |

F

| | |
|------------------------|---------------------|
| Fortran | فورترن |
| Ford Motors | شرکت خودروسازی فورد |
| Fuzzy Inference Engine | موتور استنتاج فازی |
| Fuzzy | فازی |
| Fuel Economy | صرف اقتصادی سوخت |
| Feature Selection | انتخاب مشخصه |
| Fuzzy Clustering | خوشبندی فازی |
| Feed-Forward | روبه‌جلو |
| Floating search Method | روش جستجوی شناور |

G

Genetic Algorithm

الگوریتم ژنتیک

Geographical Information system

سیستم اطلاعات جغرافیایی

H

Hydraulic Hybrid

هیبرید هیدرولیک

Hydraulic Pump-Motor

پمپ-موتور هیدرولیکی

Hardware-in-the-loop

سخت‌افزار در مدار

I

Intelligent

هوشمند

Idle Speed

سرعت بی‌باری

L

Look-Up-Table

جدول جستجو

Library

کتابخانه

Lead-Phase Compensator

جبران‌ساز پیش-فاز

M

Modeling

مدل‌سازی

Mean-Squared-Error

متوسط مربعات خطا

Mechanical Hybrid

هیبرید مکانیکی

N

Neural Networks

شبکه‌های عصبی

O

Optimization-Based

براساس بهینه‌سازی

Off-Line

آفلاین

On-Line

آنلاین

P

Pattern Recognition

شناسایی الگو

Prototype

نمونه

Principal of Optimality

اصل بهینگی

R

Rule-Based

قانون‌مند

Real-Time

زمان‌حقیقی

S

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Swash Plate Angle | زاویه صفحه مورب |
| System Identification | شناسایی سیستم |
| Sizing | سایزینگ |
| State Flow | جريان حالت |
| Sequential Decision Problems | مسائل تصمیم‌گیری ترتیبی |
| Stability | پایداری |
| Servo Controller | سرو کنترل |

T

| | |
|------------------|-------------|
| Torque Converter | مبدل گشتاور |
|------------------|-------------|

V

| | |
|-----------------------|---------------|
| Variable Displacement | جابجایی متغیر |
| Validation | تائید صحت |

Surname: Safaei

Name: Ali

Title: Modeling and Design of Intelligent Control Strategy for Parallel Hydraulic Hybrid Bus

Supervisors: Dr. Mohammad Reza Ha'iri-Yazdi and Dr. Vahid Esfahanian

Degree: Master of Science

Subject: Mechanical Engineering-Applied Design

Field: Applied Design

University of Tehran

Faculty Of Engineering

Date: September 2012

Number of pages: 108

Keywords: Hydraulic Hybrid, Bus, Modeling, Intelligent, Control Strategy

Abstract

Using hybrid powertrains is an attractive idea to reduce the fuel consumption in vehicles. Control strategy is the most challenging subject in designing of a hybrid powertrain. In this research, an intelligent control strategy for the hydraulic hybrid propulsion system of an urban bus is designed. The propulsion system consists of a diesel Internal Combustion Engine (ICE) as the primary and a hydraulic Pump/Motor (P/M) as the secondary power generation components. Also, the hydraulic accumulators are used as the energy storage components. For designing of the hybrid propulsion system, the initial sizing of two power generation components is performed by considering the performance constraints of an urban bus. After that, the hydraulic hybrid propulsion components are modeled in MATLAB/Simulink. The efficiencies of every component are considered in the modeling. Then, the components models are combined to form a feed-forward model of the hydraulic hybrid bus. For management of the torques of two power sources in the proposed hybrid powertrain, two different control strategies are designed and modeled. One of them is a rule-based control strategy which operates based on some expert knowledge generated rules. The other one is an intelligent control strategy. The output of the intelligent control strategy is determined considering the similarity of the driving cycle to some standard driving cycles. In other words, the intelligent control strategy is an optimized control strategy based on the driving cycle type. In this strategy, at first, four standard driving cycles are defined as the reference clusters. Then the optimized control strategy for each cluster is derived using a dynamic programming algorithm. In addition, several multi-layered perceptron networks are modeled in order to use the output of each optimized control strategy. After that, a clustering method with a feature selection algorithm is implemented to assign degree of similarity to each cluster for the unknown driving cycle. At last, a linear combination of four

optimized control strategy outputs is used for generating final output of the intelligent control strategy. In this combination, each output is weighted by the corresponding degree of similarity. Finally, the hydraulic hybrid bus model is simulated in MATLAB/Simulink with two proposed control strategies. The simulation results confirm that by using the hydraulic hybrid powertrain with the rule-based control strategy the fuel consumption of the bus is much lower than that of the conventional bus. Also, the results show that by using the intelligent control strategy, the fuel consumption of the hybrid bus is reduced up to 8 percent in comparison with the results of the rule-based control strategy.

University of Tehran
Faculty Of Engineering

**Dissertation Submitted in Partial
Fulfillment of The Requirements For The
Degree of Master of Science in
Mechanical Engineering-Applied Design**

**Modeling and Design of Intelligent Control
Strategy for Parallel Hydraulic Hybrid Bus**

Supervisors
Dr. Mohammad Reza Ha'iri-Yazdi and Dr. Vahid Esfahanian

by
Ali Safaei

September 2012