



طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی اتوبوس هیبرید هیدرولیکی

علی صفائی

حسن نهضتی

محسن اصفهانیان

کارشناس ارشد تحقیق و توسعه

کارشناس ارشد تحقیق و توسعه

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک

مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست
دانشگاه تهران

مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست
دانشگاه تهران

دانشگاه صنعتی اصفهان

ali.safaie@ut.ac.ir

h.nehzati@vferi.ut.ac.ir

mesf1964@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی موازی برای اتوبوس O457، ساخت شرکت ایران خودرو دیزل، به‌عنوان خودوری پایه طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده‌است. در این سیستم هیبرید یک موتور احتراقی دیزل به‌عنوان مؤلفه اول هیبرید و یک پمپ-موتور هیدرولیکی به‌عنوان مؤلفه دوم استفاده شده‌است. همچنین آکومولاتورهای هیدرولیکی وظیفه ذخیره انرژی را برعهده دارند. اتصال بین دو مؤلفه هیبرید و محور محرک خودرو از طریق یک کوپلینگ گشتاور که بعد از گیربکس‌های هریک از دو مؤلفه قرار دارد پیش‌بینی شده‌است. در طراحی سیستم هیبرید، ابتدا به‌کمک نرم‌افزار MATLAB ساینزینگ اولیه دو مؤلفه قوای محرکه انجام شده‌است. سپس برای هریک از قطعات موجود در سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی مدلی در محیط MATLAB/Simulink ایجاد شده‌است که مجموع آنها مدل روبه‌جلو جامع اتوبوس هیبرید هیدرولیکی را تشکیل می‌دهد. همچنین به‌منظور توزیع مناسب گشتاور موردنیاز خودرو میان دو مؤلفه هیبرید، یک کنترل استراتژی طراحی شده‌است. در این کنترل استراتژی حالت ترمز بازیاب نیز قرار داده شده‌است. پس از انجام طراحی و مدل‌سازی، مصرف سوخت و عملکرد اتوبوس هیبرید هیدرولیکی تحت سیکل‌های حرکتی تهران و نورمبورگ شبیه‌سازی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها کاهش حداقل ۲۵ درصدی مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیکی را نسبت به اتوبوس متعارف نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: اتوبوس، هیبرید، هیدرولیک، مدل‌سازی، ترمز بازیاب

Abstract

In this paper a hydraulic hybrid propulsion system has been designed, modeled and simulated on the O457 urban bus, which is manufactured by IKCO. An IC combustion engine is the first power generation component and a hydraulic pump-motor is the second one in the hybrid propulsion system that discussed here. Also the hydraulic accumulators have been used as the energy storage components. The two power generation components have been connected to the driven shaft throw a post-transmission torque coupling. For the designing of hybrid propulsion system, the initial sizing of two power generation components has been done by use of MATLAB software. Then a model has been created in the MATLAB/Simulink for every component of the hydraulic hybrid propulsion system. The combination of these models is known as feed-forward model of the hydraulic hybrid bus. In addition, a strategy control has been designed so as to sufficient torque distribution among the hybrid power generation components. This strategy control includes of regenerative braking, too. After the designing and modeling of the hydraulic hybrid bus, its fuel consumption and performance has been simulated in the Tehran and Nuremburg drive cycles. At least 25 percent reduction in the fuel consumption of the hydraulic hybrid bus has been seen by the simulation results.

Key words: bus, hybrid, hydraulic, modeling, regenerative braking

مقدمه

با افزایش قوانین سختگیرانه درمورد مصرف سوخت و آلودگی خودروها در سال‌های اخیر، تکنولوژی‌های جدید جهت طراحی و ساخت سیستم تولید و انتقال قدرت خودروها مورد بررسی قرار گرفته‌است. تکنولوژی هیبرید، یکی از تکنولوژی‌های اصلی در این دوره به حساب می‌آید. در این تکنولوژی، همراه موتور احتراق داخلی از یک منبع توان دیگر که دارای قابلیت ذخیره انرژی باشد، استفاده می‌شود. اتوبوس‌های داخل‌شهری با توجه به ماهیت عملکردی با سرعت پایین و توقف‌های بسیار، گزینه مناسبی برای اجرای فناوری هیبرید می‌باشند. در این نوع اتوبوس‌ها به صورت لحظه‌ای مقدار زیادی توان صرف شتابگیری می‌شود که در طی ترمزگیری به‌صورت حرارت تلف می‌گردد. به‌طور کلی سیستم‌های قوای محرکه‌ی هیبرید بیشتر به‌صورت هیبریدهای الکتریکی شناخته می‌شوند اما در سال‌های اخیر هیبریدهای مکانیکی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان هیبریدهای مکانیکی، سیستم هیبرید هیدرولیکی باتوجه به کاربرد گسترده سیستم‌های هیدرولیکی در صنعت خودرو بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. هیبرید هیدرولیکی نسبت به هیبرید الکتریکی دارای بازده بالاتر در انتقال توان بین مؤلفه‌های تولید و انتقال قدرت است. علاوه بر این مؤلفه ذخیره انرژی در هیبرید هیدرولیکی (آکومولاتورها) نسبت به باتری‌های الکتروشیمیایی چگالی توان بالاتری دارد که موجب بازیابی درصد بالاتری از انرژی ترمزی می‌شود. البته آکومولاتور در مقایسه با باتری دارای چگالی انرژی پایین‌تری است. مجموع دو نکته مذکور در مورد آکومولاتور منجر به گرایش به سمت ساختارهای هیبرید بر پایه ترمز بازیاب می‌شود. هیبریدهای هیدرولیکی در سه ساختار سری، موازی و سری-موازی قابل اجرا هستند.

در ساختار سری، یک پمپ-موتور هیدرولیکی به محور محرک و یک پمپ-موتور دیگر به محور موتور احتراق داخلی متصل است. پمپ-موتور هیدرولیک اول، به عنوان منبع محرک خودرو به‌کار می‌رود و انرژی ذخیره‌شده به‌صورت سیال پرفشار در آکومولاتورها را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. پمپ-موتور دوم، نقش شارژکننده آکومولاتورها را برعهده دارد و با دریافت توان از موتور احتراق داخلی، سیال پرفشار را در آکومولاتورها ذخیره می‌کند. مزیت اصلی ساختار سری، قرار گرفتن نقطه کاری موتور احتراق داخلی در نقطه کمترین مقدار مصرف سوخت است. درمقابل در ساختار سری تغییرات اساسی و پرهزینه‌ای روی خودروی پایه صورت می‌گیرد.

در ساختار هیبرید موازی، موتور احتراق داخلی به‌عنوان منبع اصلی توان و یک پمپ-موتور هیدرولیکی به‌عنوان منبع کمکی به‌کار می‌رود. هدف اصلی در این ساختار، بازیابی انرژی ترمزی است. برای اجرای هیبرید موازی هیدرولیکی کمترین تغییرات روی خودروی پایه نیاز است. از این رو ساختار هیبرید موازی هیدرولیکی با استقبال بیشتری نسبت به سایر ساختارهای هیبرید، ازسوی تولیدکنندگان خودرو در سراسر جهان

برخوردار بوده‌است.

ساختار هیبرید سری-موازی، قابلیت عملکرد در هر دو حالت سری و موازی را دارد. در این ساختار یک مجموعه چرخنده خورشیدی، عملکرد دوگانه سیستم را تأمین می‌کند. بدلیل پیچیدگی‌های طراحی در ساختار هیبرید سری-موازی هیدرولیکی، نمونه صنعتی تولیدشده این ساختار وجود ندارد. بیشتر تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه مدل‌سازی خودروهای هیبرید مربوط به هیبریدهای الکتریکی بوده‌است. هرچند که تحقیقات معدودی نیز در مورد هیبریدهای هیدرولیکی با هدف شبیه‌سازی عملکرد سیستم و طراحی کنترلر مناسب انجام شده‌است. در یکی از نخستین فعالیت‌های انجام‌شده (الدر و اتیس، ۱۹۷۳ [۱]) یک مدل کامپیوتری برای سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی سری ارائه کرد. این مدل قابل استفاده برای انواع خودروهای سواری، ون و اتوبوس بود. همچنین در این مدل، برای مدل‌سازی افت‌های حجمی و گشتاوری در پمپ-موتور هیدرولیکی از مدل ارائه‌شده توسط ویلسون [۲]، استفاده شده‌است. مدل ویلسون، یک ابزار کامل جهت مدل‌سازی افت‌های موجود در پمپ‌ها و موتورهای هیدرولیکی است که به‌عنوان مدل پایه برای کارهای بعدی مورد استفاده قرار گرفته‌است. البته استفاده از مدل ویلسون مستلزم دراختیار داشتن اطلاعات دقیق پمپ-موتور است. این اطلاعات دقیق با استفاده از انجام آزمایشات مخصوص روی پمپ-موتور بدست می‌آید. همچنین در سال ۱۹۷۹، بوچوالد [۳]، مطالعه‌ای روی دو اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی انجام داد. به‌منظور ارزیابی صحت مدل ساخته‌شده، بوچوالد سیستم موردنظر را روی یک خودروی ون اجرا نمود. نتیجه کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی مصرف سوخت ون را نشان می‌داد. این مدل با استفاده از نرم‌افزار فورترن ایجاد شده‌است. در سال ۱۹۸۵ تحقیقی در مورد مدل‌سازی یک خودروی سواری هیبرید موازی هیدرولیکی، توسط تولفسون، بیچلی و فرانکراک [۴]، انجام شد. این تحقیق، کاهش قابل‌توجه مصرف سوخت را در مسیرهای شهری برای خودروی سواری هیبرید موازی هیدرولیکی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۸۹ نیز ردی و رایودو [۵]، مطالعه‌ای روی یک اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی با پمپ-موتور جابجایی ثابت انجام دادند. هدف از آن مطالعه بررسی مزیت پمپ-موتورهای جابجایی متغیر بر نوع جابجایی ثابت آنها در سیستم‌های تولید و انتقال قدرت هیبریدی بود. استکی و ماتیسون [۶]، در سال ۲۰۰۳، یک پروژه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم هیبرید هیدرولیکی و طراحی استراتژی کنترل مناسب را برای یک خودروی نظامی انجام دادند. این پروژه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده‌است. در سال ۲۰۰۸ کیم [۷]، یک مدل‌سازی کامل روی انواع ساختارهای هیبرید هیدرولیکی به‌همراه طراحی استراتژی کنترل‌های بهینه انجام داد. تحقیقات کیم روی خودروی

نظامی هامر^۱ و با استفاده از نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. جو-کینگ [۸، ۹ و ۱۰] در سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ فعالیت هایی را در زمینه مدل سازی و شبیه سازی یک اتوبوس هیبرید هیدرولیکی موازی انجام داده است. کینگ، سیستم تولید و انتقال قدرت هیدرولیکی را در نرم افزار AMESim مدل سازی و سپس آن را به مدل کامل اتوبوس که در محیط Simulink ایجاد شده است، متصل نموده است. در مدل سازی مذکور بازده های پمپ-موتور هیدرولیکی و آکومولاتورها لحاظ نشده است. این مورد، مشکل مدل سازی های انجام شده توسط کینگ می باشد.

در کنار تحقیقات انجام شده در زمینه مدل سازی سیستم های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی، فعالیت هایی نیز به منظور طراحی استراتژی کنترل بهینه برای این سیستم ها صورت گرفته است. البته فرآیند مدل سازی و طراحی کنترل استراتژی بهینه در اکثر تحقیقات به صورت مکمل یکدیگر ارائه شده اند. در سال ۱۹۸۵، وو [۱۱]، یک پروژه مدل سازی و طراحی کنترل استراتژی بهینه را برای یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی انجام داد. این تحقیقات روی یک خودروی سواری انجام شد. همچنین در آن سالها، کاپلن [۱۲]، استراتژی کنترل موتور احتراق داخلی به صورت روشن-خاموش را برای ساختارهای مختلف هیبرید هیدرولیکی استفاده کرده است. در سال ۱۹۸۴ نیز، یک پروژه مدل سازی و طراحی کنترل استراتژی مناسب برای یک اتوبوس شهری هیبرید هیدرولیکی در آلمان توسط مارتینی [۱۳]، ارائه شده است. در سال ۱۹۸۷، ناکازاوا [۱۴]، یک استراتژی کنترل مناسب را برای سیستم هیبرید هیدرولیک اجرا شده روی اتوبوس های شهری ژاپن طراحی کرد. در اتوبوس های مورد نظر، سیستم هیبرید با هدف بازیابی انرژی ترمزی به کار رفته است. در سال ۱۹۸۹ پروژه مشابهی توسط دیویس [۱۵]، در کانادا و روی یک اتوبوس شهری صورت گرفته است. هوگسون [۱۶]، در سال ۱۹۹۳، استراتژی کنترل طراحی شده برای یک اتوبوس شهری در کشور آلمان را که از تکنولوژی هیبرید هیدرولیکی 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 هیدرولیکی را با ساختار موازی طراحی و اجرا نمود. مدل سازی و طراحی کنترل استراتژی این اتوبوس توسط پاولسکی [۱۷]، ارائه شده است. همچنین در سال ۲۰۰۲، شرکت فورد موتورز 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 [۱۸]، ارائه شده است. در سال ۲۰۰۸ شرکت بوش رکسروت^۲، پروژه مشابهی را روی کامیون های حمل زباله اجرا کرد. امروزه این کامیون های هیبرید هیدرولیکی در شهرهای آلمان، فرانسه و ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار می گیرند.

¹ HMMWV

² Bosch Rexroth

باتوجه به موارد بیان شده در بالا، مشخص است که توجه اصلی بین سیستم های تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی، با توجه به چگالی انرژی کم آنها معطوف به ساختار موازی و با هدف بازیابی انرژی ترمزی است. در مقاله حاضر نیز یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید موازی هیدرولیکی طراحی و مدل سازی شده است. ابتدا طراحی اولیه سیستم هیبرید ارائه شده است. سپس مدل های ایجاد شده به کمک نرم افزار MATLAB/Simulink برای ادوات سیستم تولید و انتقال قدرت ارائه شده است. در پایان مدل روبه جلوی اتوبوس در سیکل های تهران و نورمبورگ شبیه سازی و نتایج بیان شده است. شایان ذکر است که این طرح در ایران سابقه ای قابل توجهی ندارد.

۱. طراحی اولیه سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید

همان طور که اشاره شد، خودروی پایه برای اجرای سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیکی، اتوبوس شهری O457 محصول شرکت ایران خودرو دیزل می باشد. مشخصات کلی این اتوبوس در جدول ۱ ارائه شده است. توان مورد نیاز اتوبوس متعارف توسط موتور احتراق داخلی OM457LA با توان ماکزیمم ۲۲۰ کیلووات و گشتاور ماکزیمم ۱۲۵۰ نیوتن متر تأمین می شود.

جدول ۱- مشخصات اتوبوس مورد نظر

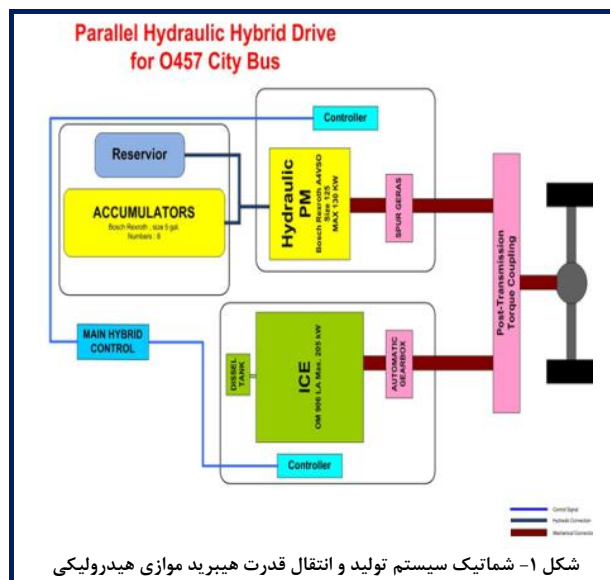
وزن اتوبوس بدون سرنشین	۹۸۲۰ kg
وزن اتوبوس با سرنشین	۱۴۷۲۰ kg
شعاع چرخ	۰/۴۶۶ m
سطح دید اتوبوس	۲/۰ m ^۲
ضریب اصطکاک غلشی (f_r)	۰/۰۱
ضریب درگ (C_D)	۰/۵۵
بازده سیستم تولید و انتقال قدرت	۰/۸۵
ضریب دنده	۴/۲
چگالی هوا (ρ_a)	۱/۲۰۲ kg/m ^۳
اینرسی دورانی (δ)	۱/۰۵

در شکل ۱ طرح شماتیک سیستم هیبرید موازی هیدرولیکی ارائه شده در این مقاله نشان داده شده است. موتور احتراق داخلی، پمپ-موتور هیدرولیکی، جعبه دنده و آکومولاتورها ادوات اصلی سیستم را تشکیل می دهند. منظور از طراحی اولیه سیستم، تعیین مشخصات فنی اولیه برای ادوات اصلی می باشد. در میان ادوات اصلی سیستم، طراحی آکومولاتورها نیاز به شبیه سازی خودرو در سیکل های حرکتی مختلف دارد، زیرا حجم مناسب برای آکومولاتورها کاملاً مرتبط با مقدار انرژی ترمزی تولیدی در طول سیکل است. از این رو حجم اولیه برای آکومولاتورها باتوجه به نمونه های قبلی هیبرید طراحی شده تعیین گردیده است. این حجم برابر با حجم نامی ۸ آکومولاتور ۲۰ لیتری است. آکومولاتورها از نوع دیافراگمی بوده و گاز محبوس در آن نیترژن می باشد.

و از نوع پیستونی محوری^۳ همراه با صفحه مورب^۴ است. گیربکس موجود در اتوبوس متعارف به عنوان گیربکس اتوبوس هیبرید نیز قابل استفاده است. درضمن، همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، کوپلینگ استفاده شده در این سیستم هیبرید یک کوپلینگ گشتاور از نوع بعد از گیربکس می باشد. مزیت کوپلینگ بعد از گیربکس آن است که سرعت شافت های ورودی به کوپلینگ با استفاده از گیربکس های موجود برای هریک از منابع تولید قدرت، یکسان و مناسب برای استفاده در محور محرک خودرو می گردد.

۲. مدل سازی اتوبوس هیبرید

همان طور که اشاره شد، مدل اتوبوس هیبرید موزی هیدرولیکی به کمک نرم افزار MATLAB/Simulink ایجاد شده است. این مدل از نوع روبه جلو است که در آن راننده با توجه به اختلاف سرعت فعلی و سرعت مطلوب، پدال گاز یا ترمز را فشار می دهد. سپس در یک بلوک محاسباتی، این فشرده شدن پدال ها به گشتاور مورد نیاز تبدیل و به کنترل مرکزی فرستاده می شود. 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 بلوک های مربوطه ارسال می نماید. گشتاور ارسال شده از طرف کنترلر مرکزی، وارد بلوک های موتور احتراق داخلی و پمپ-موتور هیدرولیکی می شود و گشتاور مورد نظر تأمین می گردد. بین موتور احتراق داخلی و کوپلینگ، بلوک گیربکس چندسرعه قرار دارد. در نهایت دو گشتاور تولید شده توسط موتور احتراق داخلی و پمپ-موتور هیدرولیکی در بلوک کوپلینگ با یکدیگر جمع می شود و پس از عبور از دیفرانسیل وارد مدل دینامیک اتوبوس می شود. در مدل دینامیک اتوبوس، معادلات دینامیک مربوط به حرکت اتوبوس با در نظر گرفتن نیروهای مقاوم، مدل سازی شده است. در حالت ترمزگیری، پمپ-موتور هیدرولیکی در حالت پمپی عمل کرده و آکومولاتورها را شارژ می کند. اختلاف گشتاور ترمزی درخواستی با گشتاور منفی پمپ-موتور، توسط ترمز مکانیکی (ترمز اصلی اتوبوس) تأمین می گردد. در شکل ۲ مدل ارائه شده در محیط Simulink نرم افزار MATLAB برای شبیه سازی اتوبوس نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید موزی هیدرولیکی

برای طراحی و انتخاب سایر ادوات مورد نیاز جهت اجرای سیستم هیبرید، ابتدا توان ماکزیمم لازم به منظور تأمین قابلیت های استاندارد شیب پیمایی و شتاب گیری اتوبوس تعیین می گردد. از این رو یک سری قیود شیب پیمایی و شتاب گیری برای اتوبوس در نظر گرفته شده است. بطور مثال حرکت اتوبوس با سرعت ثابت ۳۵ کیلومتر بر ساعت در شیب ۱۰ درصد، یک قید شیب پیمایی و صرف مدت زمان ۶۰ ثانیه برای شتاب گیری اتوبوس از حالت سکون به سرعت ۶۵ کیلومتر بر ساعت، یک قید شتاب گیری است. طی مراحل طراحی مشخص شد که مقدار توان لازم برای ارضای قیود شتاب گیری ۱۰۰ کیلووات و قیود شیب پیمایی، ۱۸۵ کیلووات است. این مقادیر توان براساس استراتژی کنترل هیبرید، توسط دو منبع تولید قدرت سیستم هیبرید تأمین می شود. البته بدیهی است که هرچه توان تولیدی توسط پمپ-موتور هیدرولیکی بیشتر باشد، مقدار انرژی ترمزی بازیاب شده نیز بیشتر خواهد بود. برای تخمین میزان توان ماکزیمم مورد نیاز هریک از دو منبع تولید قدرت براساس ارضای قیود موجود، یک مدل در نرم افزار MATLAB ایجاد شده است. همچنین نکته مهم دیگر در طراحی ادوات تولید و انتقال قدرت، سعی بر حفظ قطعات موجود است. به عبارت دیگر ادواتی انتخاب می شوند که برای تولید اتوبوس هیبرید کمترین تغییرات روی اتوبوس متعارف نیاز باشد. این موضوع یکی از دلایل تمایل تولید کنندگان به تولید خودروهای هیبرید با ساختار موزی است.

براساس موارد بیان شده در بالا، موتور احتراق داخلی OM906LA انتخاب می شود. این موتور تولید شرکت IDEM تبریز است و با حجم و وزن یکسان، در توان های ۱۷۵ تا ۲۰۵ کیلووات موجود می باشد. بدیهی است که نوع ۲۰۵ کیلووات انتخاب می شود. همچنین پمپ-موتور هیدرولیکی نوع A4VSO با ماکزیمم حجم جابجایی ۱۲۵ سانتی متر مکعب بر دور و ماکزیمم توان ۱۳۰ کیلووات محصول شرکت بوش رکسروت آلمان انتخاب می گردد. این پمپ-موتور با جابجایی متغیر

³ Variable displacement axial piston pump-motor

⁴ Swatch plate

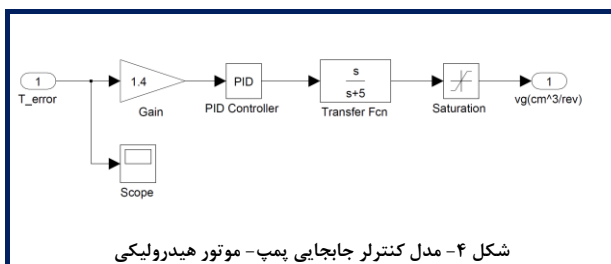
$$\eta_{mh} = \frac{\eta_t}{\eta_v} \quad (3)$$

برای حالت موتوری نیز با دقت بالایی همین مقادیر قابل استفاده هستند. این ادعا با مقایسه نمودار مربوط به بازده‌های دو حالت پمپی و موتوری برای پمپ-موتورهای پیستونی محوری موجود، صحیح می‌باشد. توجه شود که برای استفاده از مدل ارائه‌شده توسط ویلسون برای مدل‌سازی افت‌های پمپ-موتور هیدرولیکی، نیاز به مشخصات آزمایشگاهی پمپ-موتور است که در حال حاضر این اطلاعات در دسترس نمی‌باشد.

همچنین برای تعیین گشتاور تولیدشده توسط پمپ-موتور در دو حالت پمپی و موتوری، به‌ترتیب از روابط ۴ و ۵ استفاده شده‌است. همان‌طور که در این روابط مشاهده می‌شود، مقدار گشتاور تولیدشده به اختلاف فشار سیستم و جابجایی پمپ-موتور بستگی دارد. روابط ۴ و ۵ در بلوک جداگانه‌ای در مدل پمپ-موتور قرار داده شده‌اند.

$$T_{pump} = \frac{v_g \times \Delta p}{\tau \times \pi \times \eta_{mh}} \quad (4)$$

در روابط ۴ و ۵، مقدار v_g برابر با مقدار جابجایی پمپ-موتور است. این پارامتر مقدار گشتاور تولیدشده توسط پمپ-موتور را تنظیم می‌کند. از این‌رو برای دستیابی به گشتاور مطلوب در پمپ-موتور هیدرولیکی باید با ارسال سیگنال کنترلی مناسب، مقدار جابجایی پمپ-موتور را کنترل کنیم. بدین منظور در مدل پمپ-موتور از یک کنترلر خطی PID استفاده شده‌است. در این کنترلر، مقدار اختلاف میان گشتاور مطلوب و گشتاور تولیدشده توسط پمپ-موتور به عنوان ورودی وارد می‌شود. مدل کنترلر جابجایی پمپ-موتور در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۴- مدل کنترلر جابجایی پمپ-موتور هیدرولیکی

مدل موتور احتراق داخلی

به‌منظور مدل‌سازی دقیق موتور احتراق داخلی نیز، باید بازده آن را لحاظ نمود. از این‌رو برای تعیین مصرف سوخت، یک بلوک محاسباتی در نظر گرفته شده‌است که در آن با توجه به منحنی مصرف سوخت موتور احتراقی برحسب دور و گشتاور، یک جدول جستجو تهیه شده و ورودی‌های آن دور و گشتاور موتور و خروجی آن مصرف سوخت برحسب گرم بر کیلووات ساعت است. با ضرب این مقدار در توان مصرفی موتور و انتگرال‌گیری برحسب زمان، مصرف سوخت موتور برحسب گرم به‌دست می‌آید. درنهایت با توجه به چگالی سوخت مصرفی و مسافت طی‌شده،



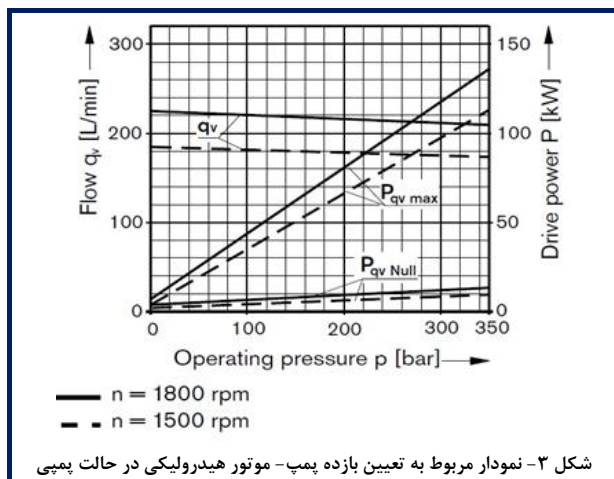
شکل ۲- مدل اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی

مدل پمپ-موتور هیدرولیکی

بحث اصلی در مدل‌سازی ادوات سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید،

$$T_{motor} = \frac{v_g \times \Delta p \times \eta_{mh}}{\tau \times \pi} \quad (5)$$

اعمال بازده‌های ادوات است. در مورد پمپ-موتور هیدرولیکی، نموداری در کاتالوگ ارائه‌شده توسط شرکت تولیدکننده وجود دارد که با استفاده از آن می‌توان مقادیر بازده‌های حجمی و مکانیکی پمپ-موتور را در حالت پمپی بدست آورد. این نمودار در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳- نمودار مربوط به تعیین بازده پمپ-موتور هیدرولیکی در حالت پمپی

برای تعیین مقادیر بازده‌ها از روی نمودار شکل ۳، روابط ۱ تا ۳ استفاده شده‌اند. در این روابط که در کاتالوگ پمپ-موتور موجود است، پارامترهای q_v و P_{max} از روی نمودار شکل ۳ تعیین می‌شوند. خروجی این روابط بازده‌های پمپ-موتور هیدرولیکی است.

$$\eta_v = \frac{q_v \times 1000}{v_g \times n} \quad (1)$$

$$\eta_t = \frac{q_v \times \Delta p}{P_{max} \times 100} \quad (2)$$

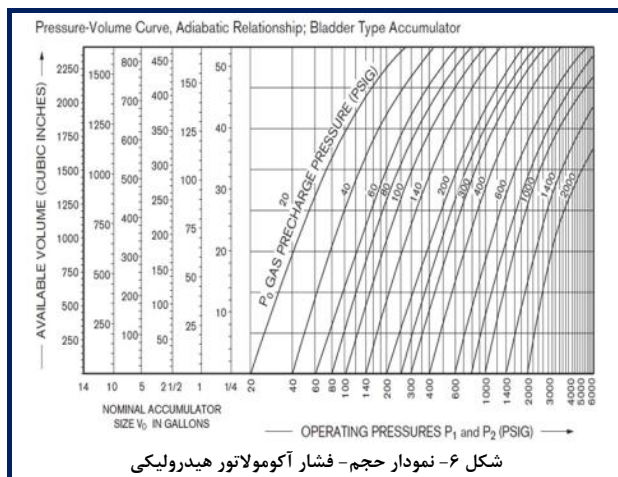
$$p_1 \times v_1^n = p_2 \times v_2^n = p_3 \times v_3^n = p_x \times v_x^n \quad (6)$$

علاوه بر نوع فرایند، مقادیر کمترین و بیشترین فشار کاری سیستم هیدرولیک و همچنین فشار شارژ اولیه آکومولاتور نیز باید تعیین گردند. فشار ماکزیمم کاری پمپ- موتور برابر ۳۴۵ بار و فشار شارژ اولیه آکومولاتور ۱۴۰ بار می باشد. باتوجه به این مقادیر و رابطه ۷ مقدار کمترین فشار کاری سیستم برابر با ۱۶۰ بار در نظر گرفته می شود.

$$P_{min} \approx 0.9 \times P_{pre} \quad (7)$$

اطلاعات مربوط به فشار و حجم سیال در حالات مختلف به عنوان ورودی برای مدل آکومولاتور استفاده می شوند.

برای به دست آوردن متغیرهای خروجی مدل آکومولاتور، از نمودار حجم سیال قابل ذخیره سازی در آکومولاتور بر حسب فشارهای کاری سیستم استفاده می شود. این نمودار که در کاتالوگ آکومولاتور موجود است، در شکل ۶ ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات موجود در این نمودار، یک جدول جستجو ایجاد و در مدل قرار داده شده است. اطلاعات ورودی مدل آکومولاتور، ورودی های این جدول جستجو هستند.



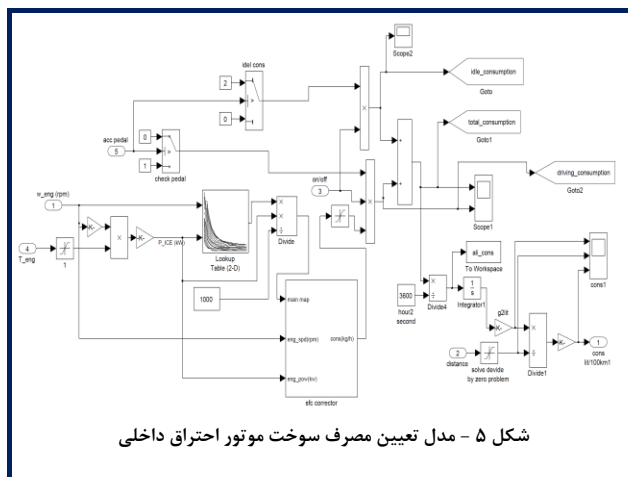
مهمترین پارامتر خروجی مدل آکومولاتور، سطح شارژ آن است. سطح شارژ آکومولاتور براساس حجم سیال درون آن بیان می شود. رابطه ۸، جهت تعیین مقدار سطح شارژ آکومولاتور به کار می رود. مدل آکومولاتور ایجاد شده برای حجم و تعداد مختلف قابل استفاده است.

$$SOC(\%) = \frac{v_x}{v_{max}} \times 100 \quad (8)$$

مدل انتقال قدرت

سیستم انتقال قدرت اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی یک کولپینگ گشتاور از نوع بعد از گیربکس می باشد. 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 یک

مصرف سوخت بر حسب لیتر در ۱۰۰ کیلومتر محاسبه می گردد. مقدار مصرف سوخت بیان گر مقدار بازده موتور احتراق داخلی است. نمایی از مدل ایجاد شده جهت تعیین مصرف سوخت موتور احتراق داخلی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل تعیین مصرف سوخت موتور احتراق داخلی

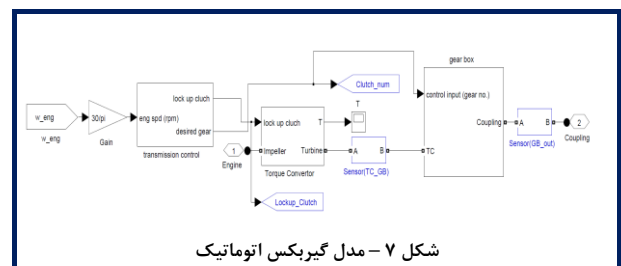
همچنین برای تعیین مقدار گشتاور تولید شده توسط موتور احتراق داخلی، گشتاور مطلوب که در بلوک کنترلر مرکزی هیبرید محاسبه می شود، به ماکزیمم مقدار گشتاور تولید شده توسط موتور در هر دور محدود شده و گشتاور خروجی بدست می آید.

مدل آکومولاتور

آکومولاتور در سیستم هیبرید هیدرولیکی، مانند باتری در سیستم هیبرید الکتریکی، وظیفه ذخیره انرژی را برعهده دارد. 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 آدیباتیک در مقابل فرایند هم دما استفاده شود. در عمل نیز به نظر می رسد که فرایند واقعی که گاز محبوس (نیترژن) تحت آن کار می کند، آن قدر سریع انجام می پذیرد که امکان انتقال حرارت بین گاز و محیط وجود ندارد. سرعت فرایند تغییر حالت گاز آکومولاتور متناسب با فرکانس تقاضای گشتاور توسط کنترلر مرکزی از پمپ- موتور است. این فرکانس با توجه به اکثر استراتژی های کنترل خودروی هیبرید موجود، مقدار بالایی می باشد. بنابراین، فرایند تغییر حالت گاز محبوس در آکومولاتور، آدیباتیک در نظر گرفته می شود. رابطه ۶، معادله تغییر حالت گاز تحت فرایند آدیباتیک را نشان می دهد. در این رابطه، فشارهای شارژ اولیه، مینیمم و ماکزیمم سیستم به ترتیب با P_0 ، P_1 و P_2 و حجم گاز آکومولاتور متناظر با هر یک از حالات نیز به ترتیب با v_0 ، v_1 و v_2 نشان داده شده اند. مقادیر P_x و v_x فشار و حجم گاز آکومولاتور در حالت مجهول مورد نظر هستند. همچنین در این رابطه، n برابر با گرمای ویژه گاز است که برای نیترژن ۱/۴ می باشد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد گیربکس استفاده‌شده در اتوبوس هیبرید، همان گیربکس موجود در اتوبوس متعارف می‌باشد. مدل گیربکس اتوماتیک، از سه قسمت تشکیل شده‌است:

- کنترل گیربکس. این بلوک براساس سرعت خودرو و با استفاده از یک روند مشخص که در کاتالوگ گیربکس به صورت یک نمودار بیان شده است، دنده مورد نظر را انتخاب می کند و به بلوک جعبه دنده فرمان می فرستد. در بلوک کنترل گیربکس، جهت تعویض دنده از یک بلوک جریان حالت، استفاده شده است.
 - جعبه دنده. این بلوک شامل چهار چرخنده با نسبت دنده های متفاوت است. چرخنده مورد نظر براساس فرمان بلوک کنترل گیربکس انتخاب می شود.
 - مبدل گشتاور. مبدل گشتاور یک مجموعه هیدرولیکی است که در گیربکس های اتوماتیک به جای کلاچ به کار می رود و حرکت خودرو را هموارتر می نماید. مدل سازی این قطعه نیز براساس کاتالوگ محصول مورد نظر انجام شده است.
- ورودی بلوک گیربکس، شافت خروجی موتور احتراقی و اطلاعات مربوط به گشتاور و سرعت دورانی آن است. خروجی این بلوک، گشتاور اصلاح شده ای است که وارد بلوک دینامیک اتوبوس می شود. بلوک گیربکس در شکل ۷ نشان داده شده است.



کوپلینگ گشتاور موردنیاز سیستم به کمک دو چرخ‌دنده (که یکی روی شافت خروجی پمپ- موتور و دیگری روی شافت خروجی گیربکس و موتور احتراق داخلی قرار دارد) مدل‌سازی شده‌است. همچنین باتوجه به سرعت‌های ماکزیمم دو منبع قدرت و سرعت ماکزیمم اتوبوس، ضریب دنده‌های مناسب تعیین شده‌است. اتصالات مکانیکی مدل کوپلینگ و گیربکس با استفاده از بلوک‌های محیط SimDriveline ایجاد شده‌است. علاوه بر مدل‌های ارائه‌شده، مدلی برای استراتژی کنترل سیستم هیبرید نیز در نظر گرفته شده‌است. این مدل بخش اصلی مدل اتوبوس هیبرید می‌باشد.

کنترلر در خودروهای هیبرید نقشی حیاتی برعهده دارد، به‌طوری‌که در صورت عدم کارکرد صحیح آن، به هیچ یک از اهداف مورد انتظار

- **حالت اول :** اتوبوس در حال شتاب‌گیری است و گشتاور مطلوب راننده کمتر از گشتاور T ، سرعت اتوبوس کمتر از سرعت V_0 و سطح شارژ آکومولاتور بیشتر از حداقل سطح شارژ مجاز می‌باشد. در این حالت، پمپ-موتور به‌تنهایی گشتاور مورد نیاز راننده را تأمین می‌کند و موتور احتراق داخلی خاموش است. مقادیر T و V_0 به‌ترتیب برابر با ۵۰۰ نیوتن‌متر و ۵ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده‌اند.

- حالت دوم : اتوبوس در حال شتاب‌گیری است و گشتاور مطلوب راننده بیشتر از گشتاور T ، سرعت اتوبوس بیشتر از سرعت V_0 و سطح شارژ آکومولاتور بیشتر از حداقل سطح شارژ مجاز می‌باشد. در این حالت، موتور احتراق داخلی روشن می‌شود و به‌عنوان منبع اصلی، گشتاور مورد نیاز راننده را تأمین می‌نماید. همچنین در مواردی که موتور احتراق داخلی به‌تنهایی قادر به تأمین گشتاور مطلوب راننده نباشد، پمپ-موتور هیدرولیکی به‌عنوان منبع کمکی، گشتاور اضافی را تولید می‌کند. در این حالت حرکتی، ذخیره انرژی در آکومولاتورها وجود ندارد.
- حالت سوم : اتوبوس در حال شتاب‌گیری است و سطح شارژ آکومولاتور کمتر یا مساوی حداقل سطح شارژ مجاز باشد. در این حالت حرکتی، پمپ-موتور هیدرولیکی نمی‌تواند به‌عنوان منبع کمکی به‌کار رود و موتور احتراق داخلی به تنهایی احتیاجات گشتاور راننده را تأمین می‌نماید. در مواردی که گشتاور ماکزیمم موتور احتراق داخلی از گشتاور مطلوب راننده بیشتر است، موتور احتراق داخلی گشتاور ماکزیمم را تولید می‌کند. گشتاور مازاد توسط پمپ-موتور هیدرولیکی در آکومولاتورها ذخیره می‌گردد.
- حالت چهارم : اتوبوس در حال ترمزگیری است. در این حالت حرکتی، پمپ-موتور به‌صورت پمپی کار می‌کند و گشتاور منفی اصلی را برای عمل ترمزگیری تأمین می‌نماید (ترمز بازیاب). در اثر اعمال این گشتاور منفی، انرژی جنبشی که در عمل ترمزگیری هدر می‌رود، به‌صورت فشار هیدرولیکی در آکومولاتورها ذخیره می‌گردد. هر زمان که گشتاور منفی تولیدی توسط پمپ-موتور برای ترمزگیری مناسب اتوبوس کافی نباشد، ترمز مکانیکی به‌کمک ترمز هیدرولیکی می‌آید و کسری گشتاور منفی را جبران می‌نماید. این عملکرد ترمزگیری، ترمز بازیاب موازی نامیده می‌شود.

در استرژئی کنترل ارائه شده، مقادیر سیگنال گشتاور مرجعی که به پمپ-موتور و موتور احتراق داخلی ارسال می شود، طوری طراحی شده اند که نوسانات شدید در سیگنال وجود نداشته باشد. وجود نوسانات شدید در

گشتاور تولیدشده توسط پمپ-موتور و موتور احتراق داخلی از صحت مدل می‌کاهد. همچنین به منظور استفاده از استراتژی کنترل ارائه شده، یک مدل به صورت جریان حالت در محیط Simulink ایجاد شده است.

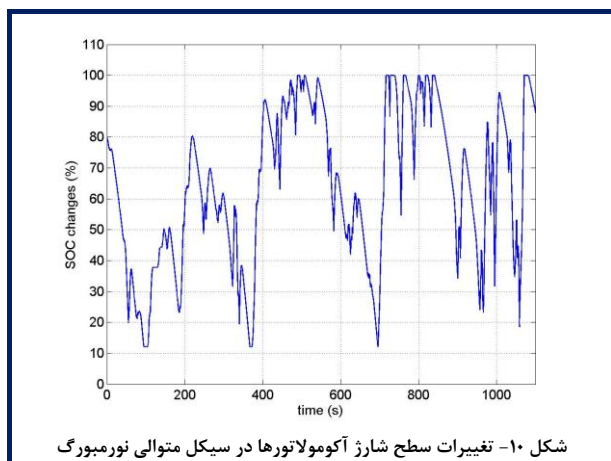
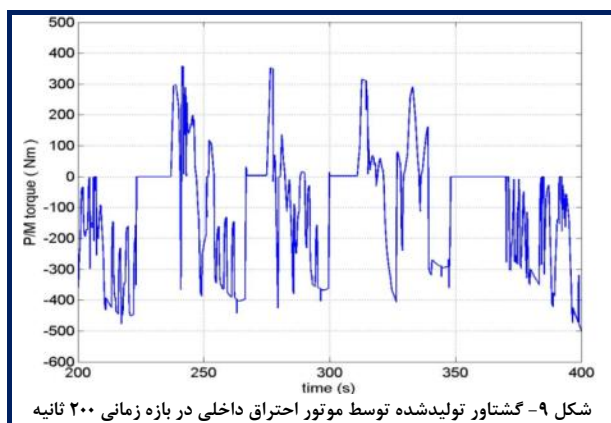
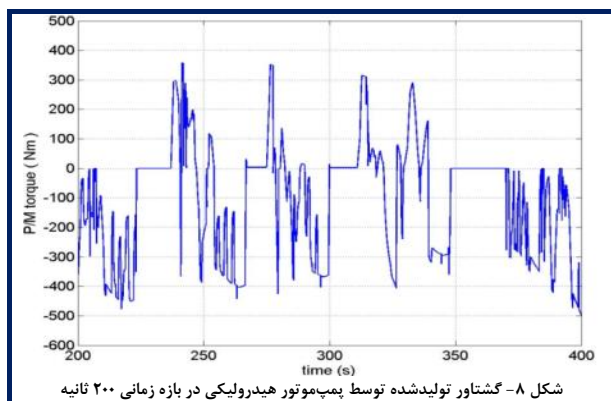
۴. انتخاب تعداد و حجم آکومولاتور

همان‌طور که اشاره شد انتخاب تعداد و حجم مناسب آکومولاتور، نیازمند شبیه‌سازی مدل است. پس از اتمام مرحله مدل‌سازی، با شبیه‌سازی مدل در سیکل رانندگی نورمبورگ، مشخصات مناسب آکومولاتور انتخاب می‌شود. برای تعیین این مشخصات، محدوده انتخاب وجود دارد. باتوجه به محصولات موجود، ظرفیت آکومولاتورهای دیافراگمی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ لیتر است. همچنین باتوجه به محدودیت‌های وزن و جانمایی، محدوده تعداد آکومولاتورها بین ۳ تا ۱۵ عدد در نظر گرفته شده است. این محدوده مربوط به آکومولاتور با ظرفیت ۲۰ لیتر می‌باشد.

طراحی تعداد و حجم آکومولاتور به این صورت انجام گرفته است که ابتدا با انتخاب آکومولاتور با ظرفیت ۲۰ لیتر، تعداد مناسب از این نوع آکومولاتور تعیین می‌گردد. بدین منظور مدل اتوبوس برای تمامی محدوده تعداد آکومولاتور شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی، گزینه دارای کمترین مصرف سوخت در قبال تعداد کمتر آکومولاتور انتخاب شده است. تعداد آکومولاتور مناسب در این مرحله ۵ عدد است. بنابراین حجم مناسب مجموعه آکومولاتور برابر با حجم ۵ آکومولاتور با ظرفیت ۲۰ لیتر می‌باشد. با تعیین حجم مناسب آکومولاتور، تعداد آکومولاتورهای با ظرفیت‌های ۳۵ و ۵۰ لیتر که همین حجم را ایجاد می‌کنند، مشخص می‌شود. با تکرار شبیه‌سازی برای این تعداد و نوع آکومولاتور، انتخاب نهایی صورت می‌گیرد. در نهایت، ۲ عدد آکومولاتور با ظرفیت ۵۰ لیتر انتخاب شده است. هریک از این آکومولاتورها دارای وزن خام ۲۰۰ کیلوگرم می‌باشد.

۵. شبیه‌سازی

پس از پایان طراحی و مدل‌سازی اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی، مدل در سیکل‌های رانندگی تهران و نورمبورگ شبیه‌سازی شده است. به منظور افزایش صحت نتایج، شبیه‌سازی در چندین سیکل متوالی انجام گرفته است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه انجام شده است. در شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ نتایج مربوط به گشتاورهای تولیدشده توسط دو منبع تولید قدرت و همچنین تغییرات سطح شارژ آکومولاتورها در سیکل رانندگی نورمبورگ نشان داده شده است.



نتایج نهایی شبیه‌سازی مصرف سوخت مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیکی موازی با اعمال وزن مسافران در سیکل‌های تهران و نورمبورگ در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲- مقایسه مصرف سوخت اتوبوس هیبرید و اتوبوس متعارف

نام سیکل	مصرف سوخت اتوبوس غیرهیبرید (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر)	مصرف سوخت اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر)	درصد کاهش مصرف سوخت (%)
تهران	۶۹/۵	۴۹/۵	۲۸/۸
نورمبورگ	۷۰/۶	۵۲/۲	۲۶/۱

Δp	اختلاف فشار سیستم هیدرولیک، bar
n	سرعت شافت پمپ- موتور هیدرولیکی، rpm
v_g	جابجایی پمپ- موتور هیدرولیکی، cm^3/rev
η_v	بازده حجمی پمپ- موتور هیدرولیکی، درصد
η_{mh}	بازده مکانیکی پمپ- موتور هیدرولیکی، درصد
η_t	بازده کلی پمپ- موتور هیدرولیکی، درصد
SOC	سطح شارژ آکومولاتور، درصد
v_x	حجم سیال درون آکومولاتور، lit
v_{max}	ظرفیت ماکزیمم آکومولاتور، lit
p_{min}	کمترین فشار مجاز آکومولاتور، bar
p_{pre}	فشار اولیه آکومولاتور، bar
T	گشتاور، Nm

مراجع

- [1]. Elder, F. T., and D. R. Otis. 1973. Simulation of a hydraulic hybrid vehicle powertrain, ASME 73-ICT-50.
- [2]. Wilson, W. E. 1950. Positive-displacement pumps and fluid motors. Sir Isaac Pitman and Sons, LTD, London.
- [3]. Buchwald, P., G. Christensen, H. Larsen, and P. S. Pedersen. 1979. Improvement of city bus fuel economy using a hydraulic hybrid propulsion system – A theoretical and experimental study. SAE paper 790305.
- [4]. Beachley, N. H. 1981. Hydromechanical transmission saves fuel. Hydraulics and Pneumatics. 73-76.
- [5]. Reddy, S. C., and G. V. N. Rayudu. 1989. Design of a regenerative braking system for city buses. SAE paper 892529.
- [6]. Stecki, J., and P. Matheson. 2005. Advances in automotive hydraulic hybrid drives. Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power. Tsukuba, Japan.
- [7]. Young Jae Kim, 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, 2008.
- [8]. YAN Ye-cui, LIU Guo-qing and CHEN Jie, “Parameters Design Strategies of a Parallel Hydraulic Hybrid Bus”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China.
- [9]. Guo-Qing Liu, Ye-Cui Yan, Jie Chen, Tian-Ming Na, “Simulation and Experimental Validation Study on the Drive Performance of a New Hydraulic Power Assist System”, Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE.
- [10]. Y. YAN, G. LIU and J. CHEN, “Integrated Modeling and Optimization of a Parallel Hydraulic Hybrid Bus”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 97–104 (2010).
- [11]. Wu, P., N. Luo, F. J. Fronczak, and N. H. Beachley. 1985. Fuel economy and operating characteristics of a hydropneumatic energy storage automobile. SAE paper 851678.
- [12]. Kapellen, D. R., F. Jarnzadeh, A. A. Frank, and S. Wang. 1984. Analysis of energy-storage concepts for refuse

در قسمت شبیه‌سازی، علاوه بر مصرف سوخت اتوبوس، عملکرد شیب‌پیمایی و شتاب‌گیری آن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین‌منظور قیود مربوط به عملکرد یک اتوبوس شهری مدنظر بوده‌است. جدول ۳ مقایسه عملکرد اتوبوس هیبرید و اتوبوس متعارف را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه عملکرد اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی و اتوبوس متعارف

شرایط کارکرد	قید	اتوبوس معمولی	اتوبوس هیبرید
شتاب‌گیری	۰ تا ۲۵ کیلومتر بر ساعت	۳,۳ ثانیه	۴,۶ ثانیه
	۲۵ تا ۳۵ کیلومتر بر ساعت	۲,۵ ثانیه	۲,۴ ثانیه
	۳۵ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت	۱,۴ ثانیه	۱,۲ ثانیه
	۴۰ تا ۴۴ کیلومتر بر ساعت	۱,۳ ثانیه	۱,۱ ثانیه
	۴۴ تا ۶۵ کیلومتر بر ساعت	۱۷,۸ ثانیه	۱۸,۳ ثانیه
شیب‌پیمایی	شیب ۴ درصد	۹۴,۵ کیلومتر بر ساعت	۷۶,۵ کیلومتر بر ساعت
	شیب ۷ درصد	۸۰ کیلومتر بر ساعت	۵۱ کیلومتر بر ساعت
	شیب ۱۰ درصد	۵۰ کیلومتر بر ساعت	۳۹ کیلومتر بر ساعت
	شیب ۱۴ درصد	۳۵ کیلومتر بر ساعت	۲۱ کیلومتر بر ساعت

۶. جمع‌بندی

همان‌طورکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود با اجرای تکنولوژی هیبرید هیدرولیکی، مصرف سوخت اتوبوس O457، ۲۶/۱ درصد در سیکل نورمبورگ و ۲۸/۸ درصد در سیکل تهران کاهش می‌یابد. مدل‌های ارائه‌شده توسط محققین دیگر در خارج از کشور نظیر بوچوالد، هوگسون و پاولسکی نیز کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی مصرف سوخت اتوبوس شهری را با استفاده از تکنولوژی هیبرید موازی هیدرولیکی نشان داده‌است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به‌منظور تست عملکرد اتوبوس هیبرید (جدول ۳) نشان می‌دهد که اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی عملکرد شتاب‌گیری تقریباً یکسانی با اتوبوس متعارف دارد ولی شیب‌پیمایی اتوبوس هیبرید، ضعیف‌تر از اتوبوس متعارف است. البته قابلیت شیب‌پیمایی اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی، باتوجه به مسیرهای تردد یک اتوبوس شهری در شهر تهران که ماکزیمم شیب ۴ درجه را دارد، قابل قبول است.

به‌منظور ادامه این طرح، می‌توان صحت مدل را با افزایش اطلاعات مربوط به بازده‌های پمپ- موتور هیدرولیکی بالا برد. همچنین کیفیت عملکرد استراتژی کنترل با استفاده از کنترلرهای پیشرفته‌تر قابل بهبود است.

فهرست علائم

q_v	دبی واقعی پمپ- موتور هیدرولیکی، lit/min
p_{max}	توان ماکزیمم واقعی پمپ- موتور هیدرولیکی، kW

- [16]. Hugosson, C. 1993. Cumulo hydrostatic drive – A vehicle drive with secondary control. Third Scandinavian International Conference on Fluid Power. Linköping, Sweden.
- [17]. Pawelski, Z., Modeling and Design of Hydrobus. Technical University of Lodz, , 2000.
- [18]. 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.
- collection trucks. SAE paper 840056.
- [13]. Martini, S. 1984. The M.A.N. hydrobus: A drive concept with hydrostatic brake energy recovery. International Symposium on Advanced and Hybrid Vehicles.
- [14]. Nakazawa, N., Y. Kono, E. Takao, and N. Takeda. 1987. Development of a braking energy regeneration system for city buses. SAE paper 872265.
- [15]. Davies, A. S. 1989. The reduction of city bus exhaust emissions by means of a regenerative powertrain. SAE paper 890267.