



تأثیر بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال بر مصرف سوخت و آلاینده‌های خودروی هیبرید برقی

مرتضی منتظری^{۱*}، سحر هاشمی زنوزی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵. montazeri@iust.ac.ir

چکیده- در این مقاله، ایده بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی ارائه شده و تاثیر آن بر مصرف سوخت و انتشار آلودگی خودروی هیبرید از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم‌های تعلیق فعال از عملگرهای فعال برای اعمال نیرو و کنترل ارتعاشات بدنه خودرو استفاده می‌نمایند. عملگرهای فعال در هنگام نیاز، انرژی ارتعاشات را جذب نموده و یا به سیستم انرژی تزریق می‌کنند. با به‌کارگیری سیستم بازیابی انرژی، بخشی از انرژی ارتعاشات سیستم تعلیق می‌تواند به انرژی الکتریکی تبدیل شده و ذخیره گردد. در خودروهای هیبرید برقی، سیستم تعلیق فعال انرژی مورد نیاز خود را از منبع ذخیره انرژی الکتریکی خودرو دریافت می‌نماید. در این مقاله از یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی، شامل باتری و ابرخازن، برای تامین انرژی مورد نیاز سیستم تعلیق فعال و اجزاء الکتریکی خودرو استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با به‌کارگیری سیستم بازیابی انرژی، مصرف سوخت و آلاینده‌های خودرو کاهش می‌یابد.

کلید واژگان: بازیابی انرژی، سیستم تعلیق فعال، خودروی هیبرید برقی، منبع ذخیره انرژی ترکیبی.

Effect of Energy Regeneration of Active Suspension System on Fuel Consumption and Emissions of Hybrid Electric Vehicle

M. Montazeri^{1*}, S. Hashemi Zenouzi²

1- Associate Professor, Department of Mechanical Eng, Iran Univ. of Science and Tech.

2- M. Sc. Student, Department of Mechanical Eng, Iran Univ. of Science and Tech.

*P. O. B. 16765-163. Tehran, Iran. montazeri@iust.ac.ir

Abstract- In this paper the idea of energy regeneration of active suspension system in hybrid electric vehicle is presented and its influence on the fuel consumption and emissions of vehicle is investigated through computer simulations. Active suspension systems employ active actuators to apply force and control the vibrations of vehicle body. The active actuators either insert energy to the system or extract the energy of vibrations when required. Using an energy regeneration system, the extracted energy of vibrations can be recovered and stored in the energy storage system. In hybrid electric vehicles, the active suspension supplies its required energy from the electric energy storage system of vehicle. In this work, a hybrid battery/supercapacitor energy storage system is employed to supply the required energy of active suspension and other electric components of vehicle. The simulation results show that with application of the energy regeneration system, the fuel consumption and exhaust emissions of vehicle is reduced.

Keywords: Energy Regeneration, Active Suspension System, Hybrid Electric Vehicle, Hybrid Energy Storage System.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش نگرانی‌ها درباره آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی تلاش‌های زیادی برای یافتن یک سیستم مناسب جایگزین برای موتورهای احتراقی انجام شده است. در حالی که تحقیقات بر روی انواع سیستم‌های قابل استفاده جهت تامین انرژی خودرو ادامه دارد، خودروهای هیبرید برقی^۱ به عنوان یک راه حل فوری برای این مشکل مورد توجه قرار گرفته‌اند. خودروهای هیبرید برقی از ترکیب تکنولوژی خودروهای احتراقی و خودروهای برقی بهره می‌برند. این خودروها دارای یک موتور احتراق داخلی، یک موتور الکتریکی، و منبع ذخیره انرژی الکتریکی^۲ هستند.

از طرف دیگر، سیستم‌های تعلیق فعال^۳ به منظور دستیابی به راحتی سفر و خوش‌فرمانی و پایداری بالا در خودروها مطرح شده‌اند. در سیستم‌های تعلیق غیر فعال که از اجزایی با ضرایب فنریت و میرایی ثابت تشکیل می‌شوند، اگر طراحی با هدف رسیدن به پایداری بیشتر انجام شود، راحتی سفر کاهش خواهد یافت و اگر راحتی سفر بیشتر مد نظر قرار گیرد از خوش‌فرمانی و پایداری خودرو کاسته خواهد شد [۱]. به منظور دستیابی همزمان به راحتی سفر و پایداری بالا ایده سیستم‌های تعلیق فعال مطرح شده است که در آنها از عملگرهای فعال برای اعمال نیروهای مناسب استفاده می‌شود.

عملگرهای سیستم تعلیق فعال می‌توانند بسته به فرامین کنترلی، در هر لحظه به سیستم انرژی تزریق نمایند و یا اینکه انرژی ارتعاشات سیستم را جذب کنند. در سیستم‌های تعلیق فعال معمولی، انرژی جذب شده از ارتعاشات به صورت گرما تلف می‌شود. اما با استفاده از یک سیستم بازیابی انرژی می‌توان این انرژی را به صورت

الکتریکی تبدیل نموده و در یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی انباشت.

وجود منبع ذخیره انرژی الکتریکی در خودروهای هیبرید برقی می‌تواند امکانات جدیدی را برای به کارگیری سیستم تعلیق فعال در آنها فراهم نماید. سیستم تعلیق فعال در این خودروها می‌تواند انرژی خود را از منبع ذخیره انرژی الکتریکی دریافت کند و از قابلیت پاسخ سریع آن بهره‌مند گردد. این در حالی است که به کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروهای معمولی با مشکلاتی همراه است. از سوی دیگر مسئله برد^۴ خودرو در خودروهای برقی بسیار حائز اهمیت است و به کارگیری این سیستم در خودروهای برقی می‌تواند سبب کاهش برد خودرو گردد. از این رو خودروهای هیبرید برقی می‌توانند گزینه بهتری برای به کارگیری سیستم تعلیق فعال باشند.

انواعی از سیستم‌های تعلیق فعال تاکنون در خودروهای مسابقه و نظامی یا خودروهای بسیار لوکس مانند مرسدس بنز W215 به کار گرفته شده است. شرکت بوز^۵ نیز سیستم تعلیق فعالی ساخته است که قابلیت بازیابی انرژی دارد [۲]. هرچند ایده بازیابی انرژی در سیستم تعلیق فعال در خودروهای معمولی و برقی قبلاً مطرح گردیده و مورد مطالعه قرار گرفته است [۳-۷]، لکن منتظری و کاشانی [۸] در سال ۲۰۰۲ برای اولین بار ایده بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال در خودروهای هیبرید برقی را مطرح نمودند. در طرح آنها انرژی مصرفی سیستم تعلیق فعال از باتری‌های خودرو تامین شده و انرژی بازیاب شده نیز در باتری‌ها ذخیره می‌شود. اما در مطالعه انجام شده توسط منتظری و کاشانی، جزئیات طرح به طور کامل ارائه نشده است. همچنین تأثیر بازیابی انرژی بر مصرف سوخت و آلاینده‌های خودرو در کار آنها مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این مقاله ایده بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی ارائه شده و تأثیر آن بر مصرف

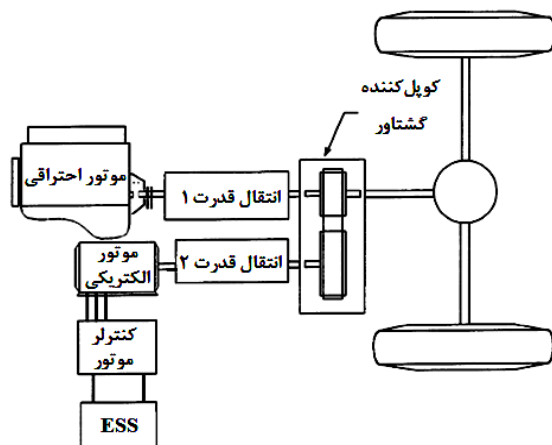
1. Hybrid Electric Vehicle (HEV)

2. Energy Storage System (ESS)

3. Active Suspension (AS)

4. Range

5. Bose



شکل ۱ ساختار خودروی هیبرید برقی موازی [۹]

باتری‌ها متداول‌ترین وسیله ذخیره انرژی الکتریکی هستند که در خودروها مورد استفاده قرار می‌گیرند. باتری‌ها دارای ظرفیت ذخیره انرژی نسبتاً بالایی هستند، اما در مقابل، عمر چرخه‌ای کوتاهی دارند و در اثر شارژ و دشارژ پیاپی دچار افت ظرفیت می‌شوند. همچنین باتری‌ها توان بالایی ندارند. به عبارت دیگر در اثر شارژ و دشارژ سریع در باتری، گرما تولید شده و بازدهی و عمر آن کاهش می‌یابد [۱۰].

وسیله دیگری که می‌تواند برای ذخیره انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد، ابرخازن است. ابرخازن‌ها بر خلاف باتری‌ها عمر چرخه‌ای بسیار بالا و توان بسیار خوبی دارند. با این حال ابرخازن‌ها ظرفیت ذخیره انرژی بسیار پایینی دارند. با توجه به خصوصیات متضاد باتری و ابرخازن، ترکیبی از این دو وسیله می‌تواند منبع ذخیره انرژی مناسبی تشکیل دهد [۹].

در این مقاله از یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی استفاده شده است، به این صورت که بار سیستم تعلیق فعال که یک بار به شدت متغیر با مقادیر ناگهانی بالاست، به ابرخازن‌ها وارد می‌شود. سیستم تعلیق فعال در هنگام مصرف و بازیابی انرژی، ابرخازن‌ها را شارژ و دشارژ می‌نماید. این کار ادامه می‌یابد تا هنگامی که ابرخازن‌ها به حد پایین یا بالای تعیین شده برای سطح شارژ (SOC)^۴ برسند. هنگامی که سطح شارژ به حد پایین تعیین شده برسد، باتری‌ها با توان ثابت شروع به

سوخت و آلاینده‌های خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا خودروی هیبرید برقی و سیستم تعلیق فعال به طور جداگانه شبیه‌سازی شده‌اند. سپس روشی برای شبیه‌سازی همزمان دو سیستم ارائه گردیده است. در این تحقیق، هریک از عملگرهای سیستم تعلیق فعال به صورت یک موتور دورانی DC با پیچ و مهره ساچمه ای^۱ جهت تبدیل حرکت دورانی به خطی، مدل‌سازی شده است. همچنین از یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی باتری و ابرخازن^۲ برای تامین بار سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی استفاده شده است. با استفاده از روش ارائه شده، خودروی هیبرید برقی با سیستم تعلیق فعال شبیه‌سازی شده و تاثیر انرژی مصرفی و بازیاب شده سیستم تعلیق فعال بر مصرف سوخت و آلاینده‌گی خودرو مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ایده به کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی با استفاده از سیستم ذخیره انرژی ترکیبی^۳

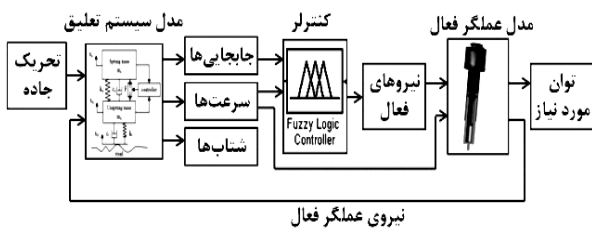
خودروهای هیبرید برقی، با توجه به نوع ترکیب دو منبع قدرت به انواع هیبرید سری، هیبرید موازی و هیبرید ترکیبی تقسیم می‌شوند. در خودروی هیبرید موازی - که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است - هر دو منبع قدرت به زنجیره قدرت خودرو متصل شده و می‌توانند به طور جداگانه خودرو را به حرکت در آورند. ساختار یک خودروی هیبرید موازی در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم تعلیق فعال در خودروهای هیبرید، انرژی مورد نیاز خود را از منبع ذخیره انرژی الکتریکی دریافت می‌نماید و انرژی بازیاب شده خود را نیز در آن ذخیره می‌کند.

1. Ball-Screw and Nut

2. Supercapacitor , Ultracapacitor

3. Hybrid Energy Storage System (HESS)

4. State of Charge

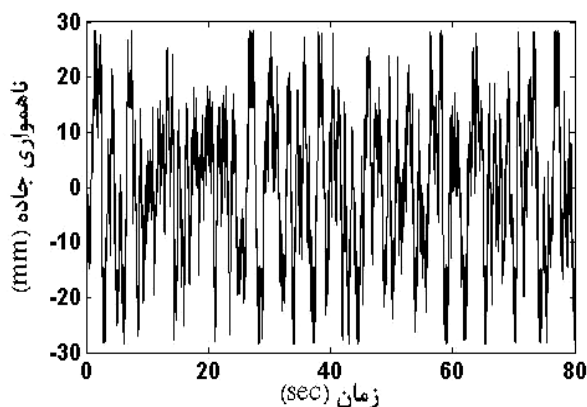


شکل ۳ مراحل شبیه‌سازی سیستم تعلیق فعال

در ادامه، مباحث مربوط به شبیه‌سازی سیستم تعلیق فعال، شامل تحریک جاده، مدلسازی سیستم تعلیق، کنترل کننده و مدل عملگر فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

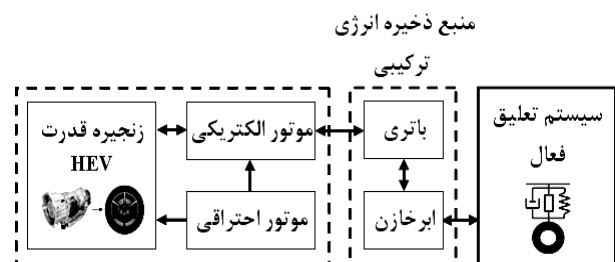
۳-۱- تحریک جاده

عامل ایجاد ارتعاشات در سیستم تعلیق خودرو ناهمواری‌های سطح جاده می‌باشد. در بررسی راحتی سفر خودرو، مطالعه و بیان دقیق تحریک جاده از اهمیت خاصی برخوردار است. در بعضی تحلیل‌ها از توابع ساده ریاضی مانند توابع هارمونیک برای مدلسازی تحریک جاده استفاده می‌شود، اما بیان ناهمواری‌های جاده برحسب توابع اتفاقی واقع‌بینانه‌تر می‌باشد. در این مقاله از یک تحریک جاده تصادفی استفاده شده است. این جاده، تغییر یافته جاده‌ای است که توسط شرکت سایپا از طریق اندازه‌گیری مستقیم طبق استاندارد ASTM E950 [۱۱] در سرعت ثابت ۸۰ کیلومتر در ساعت به‌دست آمده است. شکل ۴ پروفیل جاده مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴ پروفیل تحریک جاده تصادفی

شارژ ابرخازن‌ها می‌نمایند تا سطح شارژ مجدداً به مقدار قابل قبولی برسد. همچنین هنگامی که سطح شارژ به حد بیشینه خود برسد، مقداری از انرژی ذخیره شده ابرخازن‌ها به باتری‌ها منتقل می‌شود. به این ترتیب، انرژی مورد نیاز سیستم تعلیق فعال به صورت غیر مستقیم توسط باتری‌های خودرو تأمین می‌گردد. شکل ۲ نحوه ارتباط سیستم تعلیق فعال و سایر اجزای خودروی هیبرید برقی از لحاظ تبادل انرژی را نشان می‌دهد.



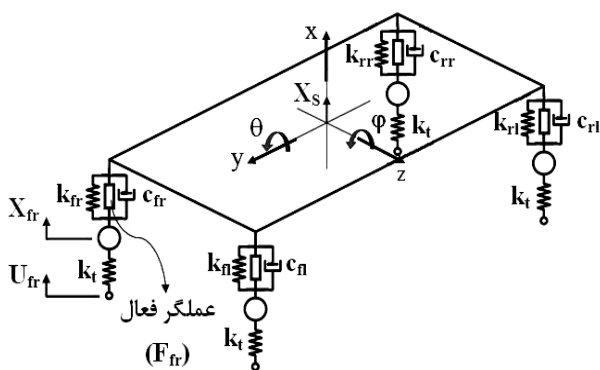
شکل ۲ به کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی

۳- شبیه‌سازی سیستم تعلیق فعال

نمودار شبیه‌سازی سیستم تعلیق فعال برای یک سیستم دو درجه آزادی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این سیستم، یک جرم متمرکز در نظر گرفته شده است که بر روی یک چرخ قرار داده شده و توسط یک فنر و میراکننده و عملگر فعال به آن متصل شده است و چرخ بر روی جاده ناصافی حرکت می‌نماید. همانطور که در شکل پیداست، مدل سیستم تعلیق در هر لحظه تحریک جاده را دریافت نموده و جابجایی و سرعت و شتاب بدنه و چرخ را محاسبه می‌نماید. سپس با توجه به جابجایی و سرعت نسبی بدنه و چرخ، کنترل کننده نیروی مورد نیاز سیستم تعلیق فعال را محاسبه می‌نماید. این نیرو به مدل عملگر فعال داده می‌شود تا انرژی مورد نیاز آن محاسبه گردد و محدودیت سرعت و نیروی عملگر در آن اعمال شود. به این ترتیب نیروی عملگر فعال برای لحظه بعد محاسبه شده و به مدل سیستم تعلیق وارد می‌شود.

۳-۲- مدل سازی سیستم تعلیق خودرو

جهت تحلیل ارتعاشات خودرو معمولاً از مدل های دو درجه آزادی، چهار درجه آزادی و هفت درجه آزادی استفاده می شود. مدل هفت درجه آزادی خودرو از کامل ترین مدل های مورد استفاده در تحلیل راحتی سفر خودرو می باشد، به همین جهت در این مقاله از مدل هفت درجه آزادی برای مدل سازی سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است. از هفت درجه آزادی مدل، سه درجه آزادی مربوط به حرکات عمودی بدنه^۴، چرخش^۵ و غلت^۶ بدنه صلب و چهار درجه آزادی مربوط به حرکات عمودی چرخ ها می باشد. در سیستم تعلیق فعال، علاوه بر اجزای غیر فعال، بالای هریک از چرخ ها یک عملگر فعال بین جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده قرار می گیرد. نمای شماتیک این مدل در شکل ۶ دیده می شود.



شکل ۶ مدل هفت درجه آزادی خودرو

جرم ها و ممان اینرسی های مربوط به سیستم تعلیق خودرو مطابق خودروی سمند انتخاب شده اند. اما باید در نظر داشت که طراحی ضرایب فنریت و میرایی خودروی سمند برای تعلیق غیرفعال صورت گرفته است. در سیستم تعلیق فعال، عملگر فعال نقش اجزای غیر فعال را بر عهده می گیرد. با این حال برای حفظ ایمنی خودرو بهتر است فنر و میراکننده ضعیفی به طور موازی با عملگر فعال قرار داده شود. در این مقاله،

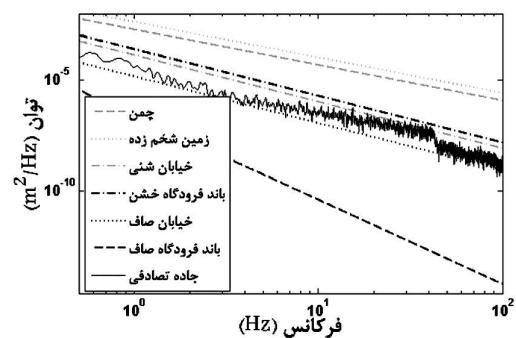
با توجه به این که بررسی تحریک تصادفی در حوزه زمان مفهوم خاصی را نمی رساند، معمولاً برای بررسی تحریک تصادفی از میانگین های آماری مانند تابع خود ارتباطی^۱ استفاده می شود. تابع چگالی طیفی توان (PSD)^۲ نیز بیان تابع خود ارتباطی در حوزه فرکانس می باشد. استاندارد ایزو ۸۶۰۸ [۱۲] رابطه (۱) را برای مدلسازی PSD جاده های اتفاقی ارائه کرده است.

$$G_d(n) = C n^{-w} \quad (1)$$

در رابطه فوق n فرکانس فاصله ای^۳ با واحد cycle/m، C ضریب زبری و w شاخص جاده می باشد. ضرایب C و w برای جاده های مختلف، در استاندارد ایزو تعریف شده اند. رابطه (۱) را می توان به صورت زیر بر حسب فرکانس بیان نمود:

$$G_d(f) = G_d(n = \frac{f}{v}) / v = C \frac{v^{w-1}}{f^w} \quad (2)$$

جاده های مختلف براساس رابطه (۲) و ضرایب ارائه شده در استاندارد در شکل ۵ رسم شده اند. PSD جاده تصادفی شکل ۴ نیز محاسبه شده و در این شکل با جاده های استاندارد مقایسه شده است. شکل ۵ نشان می دهد که جاده مورد نظر از لحاظ شدت ناهمواری در محدوده بین خیابان صاف و خیابان شنی قرار می گیرد.



شکل ۵ مقایسه جاده تصادفی با جاده های استاندارد

4. Bounce
5. Pitch
6. Roll

1. Autocorrelation
2. Power Spectral Density
3. Spatial Frequency

۳-۳- مدل سازی عملکرد فعال

در کارهای تحقیقاتی که در زمینه سیستم تعلیق فعال انجام شده است، انواع مختلفی از عملکردهای فعال مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌اند. در بعضی از مراجع [۵، ۶] از موتورهای خطی و در بعضی دیگر [۷] از موتورهای دورانی همراه با مکانیزمی جهت تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی استفاده شده است.

در این مقاله عملکرد فعال به صورت یک موتور/ژنراتور دورانی همراه با پیچ و مهره ساچمه‌ای در نظر گرفته شده است. نمای شماتیک عملکرد فعال در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل اجزای بیرونی به صورت برش خورده نمایش داده شده‌اند تا بخش‌های داخلی قابل دیدن باشد.



شکل ۷ عملکرد فعال

ضرایب فنریت و میرایی تعلیق فعال به ترتیب برابر ۷۵٪ و ۲۰٪ تعلیق غیرفعال سمند قرار داده شده است. کاهش ضرایب میرایی و فنریت، نیروهای غیر فعال وارد بر بدنه خودرو را کاهش داده و امکان عملکرد بهتر سیستم تعلیق فعال را فراهم می‌نماید. مشخصات سیستم تعلیق در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات سیستم تعلیق خودرو

عنوان	نشانه	مقدار
جرم فنربندی شده	m_s	۱۳۷۵/۹ kg
ممان اینرسی جرم فنربندی شده	$I_\phi I_\theta$	۴۸۴/۴ ۲۳۴۴/۴ kg.m ²
جرم فنربندی نشده (عقب/جلو)	$m_{uf} m_{ur}$	۴۰ ۴۰ kg
ضریب فنریت لاستیک	k_t	۱۸۲۰۸۷ N/m
ضریب فنریت سیستم تعلیق (عقب/جلو)	$k_{fr,l} k_{rr,l}$	۱۰۴۹۲/۴۱ ۹۵۶۰/۸۵ N/m
ضریب میرایی سیستم تعلیق	c_{xx}	۵۰۰ N.s/m
فاصله عرضی چرخ‌ها	t_0	۱/۴۴ m
فاصله طولی محور چرخ‌ها	L	۲/۶۳ m
فاصله مرکز جرم از محورهای عقب/جلو	$l_f l_r$	۱/۱۲ ۱/۵۱ m

اگرچه مراحل شبیه‌سازی که در شکل ۳ نشان داده شد، مربوط به سیستم دو درجه آزادی می‌باشد، می‌توان آن را به سیستم تعلیق فعال هفت درجه آزادی نیز تعمیم داد. تنها تفاوت در شبیه‌سازی این دو سیستم این است که در مدل هفت درجه آزادی، تحریک جاده برای هر چرخ جداگانه در نظر گرفته می‌شود و بین بدنه و هر یک از چرخ‌ها یک عملکرد فعال فرض می‌گردد که توسط یک کنترل کننده عمل می‌نماید. به عبارت دیگر، یک سیستم هفت درجه آزادی، دارای چهار عملکرد فعال و چهار کنترل کننده می‌باشد.

راحتی سفر و ایمنی از دیدگاه نیروی چسبندگی تایر به زمین مورد نظر قرار گرفته است. به بیان دیگر، قواعد فازی کنترل کننده طوری تعیین شده است که شتاب‌های بدنه را کاهش دهد و از تغییر طول بیش از حد سیستم تعلیق جلوگیری نماید.

۴- شبیه‌سازی خودروی هیبرید برقی

در این مقاله شبیه‌سازی خودروی هیبرید توسط نرم‌افزار ادوایزر^۳ [۱۳] انجام شده است. این نرم‌افزار مجموعه‌ای از فایل‌ها شامل اطلاعات و مدل‌ها است که توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر آمریکا^۴ برای استفاده در محیط متلب^۵ و سیمولینک جهت تحلیل عملکرد و مصرف سوخت خودروهای معمولی، خودروهای الکتریکی و خودروهای هیبرید الکتریکی ایجاد شده است. افزودن مدل‌های جدید به این نرم‌افزار به راحتی امکان پذیر است. این نرم‌افزار از روش شبیه‌سازی رو به عقب استفاده می‌کند. در روش رو به عقب راننده مدل نمی‌شود، بلکه شبیه‌سازی از سیکل رانندگی آغاز می‌شود و گشتاور یا نیروی مورد نیاز هر جزء توسط جزء پایین دست تعیین می‌گردد. این جریان همچنان ادامه دارد تا اینکه سوخت مصرفی یا انرژی الکتریکی مورد نیاز برای طی الگوی حرکت محاسبه شود.

سیکل‌های رانندگی، منحنی‌های سرعت برحسب زمانی هستند که برای نوع خاصی از وسیله نقلیه در یک محیط حرکتی با ویژگیهای خاص، برای نشان دادن الگوی پیروی شونده رانندگی برای آن شرایط به کار می‌روند. سیکل رانندگی شهر تهران در شکل ۸ نشان داده شده است. این سیکل برای اولین بار توسط آزمایشگاه شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌های دانشگاه علم و صنعت ایران براساس داده‌برداری در سطح شهر تهران به دست آمده است [۱۴].

عملگر فعال به منظور محاسبه تلفات انرژی و محدودیت‌های عملگر، مدلسازی شده است. این مدلسازی به صورت رو به عقب^۱ انجام شده است. به این صورت که نیرو و سرعت مطلوب، ورودی مدل را تشکیل می‌دهد و خروجی آن توان الکتریکی مورد نیاز است. سرعت و نیروی مطلوب با ضرایب تبدیل پیچ و مهره ساچمه‌ای به سرعت زاویه‌ای و گشتاور تبدیل شده و به مدل موتور الکتریکی داده می‌شود.

موتور دورانی مورد نظر یک موتور DC مغناطیس دائم اِتِک بریگز و استراتون^۲ می‌باشد. در مدلسازی موتور محدودیت سرعت و گشتاور اعمال شده است، به گونه‌ای که اگر سرعت مطلوب بیش از سرعت بیشینه موتور باشد، موتور هیچ نیرویی وارد نمی‌نماید و اگر نیروی تعیین شده توسط کنترلر بیش از نیروی بیشینه موتور باشد، نیروی بیشینه به جای نیروی مورد نیاز وارد می‌گردد. همچنین تلفات الکتریکی موتور در محاسبات منظور شده است. بازدهی پیچ و مهره ساچمه‌ای به طور ثابت برابر ۹۲٪ در نظر گرفته شده است.

به این ترتیب، توان الکتریکی مورد نیاز موتور و سرعت و گشتاور خروجی آن در هر لحظه محاسبه می‌شود. توان مورد نیاز موتور می‌تواند در هر لحظه مقادیر مثبت یا منفی به خود بگیرد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده حالتی هستند که عملگر به سیستم انرژی تزریق می‌کند و مقادیر منفی نشان‌دهنده لحظاتی هستند که موتور به صورت ژنراتوری عمل نموده و انرژی بازیابی می‌نماید.

۳-۴- کنترل سیستم تعلیق فعال

در این مقاله برای کنترل سیستم تعلیق فعال یک کنترل کننده فازی طراحی شده است. کنترلر فازی تغییر طول و سرعت نسبی دو سر عملگر فعال را به عنوان ورودی دریافت نموده و با توجه به قواعد فازی تعیین شده، نیروی لازم آن عملگر را محاسبه می‌نماید. در طراحی این کنترلر، افزایش

3. ADVISOR

4. National Renewable Energy Laboratory (NREL)

5. MATLAB

1. Backward

2. Briggs & Stratton Etek brushed DC motor

موتور الکتریکی به عنوان منبع کمکی استفاده می‌شود. در این استراتژی کنترلی سعی می‌شود که نقطه کاری موتور احتراقی در هر لحظه بهینه باشد. جزئیات مربوط به این کنترل کننده فازی قبلاً در مقاله دیگری شرح داده شده است [۱۵].

جدول ۲ مشخصات خودروی هیبرید برقی

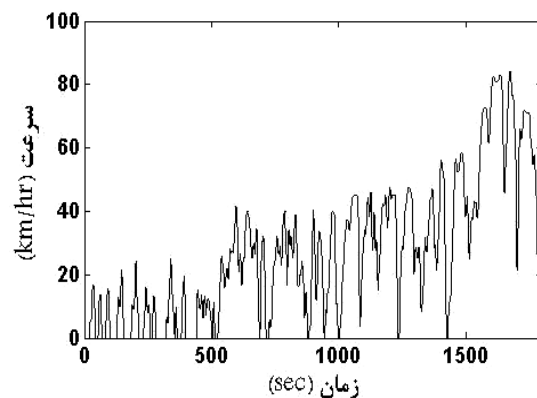
مشخصات	اجزاء
جعبه دنده ۵ دنده دستی با نسبت دنده‌های ۲/۸۴، ۳/۷۷، ۵/۰۱، ۵/۵۷ و ۱۳/۴۵.	جعبه دنده
موتور SI ۱/۸ لیتر دوگانه‌سوز سمند با حداکثر توان ۷۵ کیلو وات کوچک شده با ضریب ۰/۶۸	موتور احتراق داخلی
موتور AC القایی وستینگهاوس با حداکثر توان ۷۵ کیلو وات کوچک شده با ضریب ۰/۲۳	موتور الکتریکی
۱۴ عدد باتری سرب اسیدی VRLA هاوکر- جنسیس 12V25Ah10EP	سیستم ذخیره انرژی الکتریکی

۵- مدل‌سازی سیستم ذخیره انرژی الکتریکی

چنانچه پیشتر گفته شد، در این مقاله ایده به‌کارگیری سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی ارائه گردیده است. در این قسمت مدل‌سازی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی شرح داده می‌شود.

۵-۱- مدل‌سازی باتری

باتری VRLA هاوکر جنسیس ۲۵ آمپر ساعت در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی باتری از مدل مقاومت داخلی با پارامترهای متغیر [۱۶] استفاده شده است. این مدل که در شکل ۹ نشان داده شده است از یک منبع ولتاژ و یک مقاومت تشکیل می‌شود.



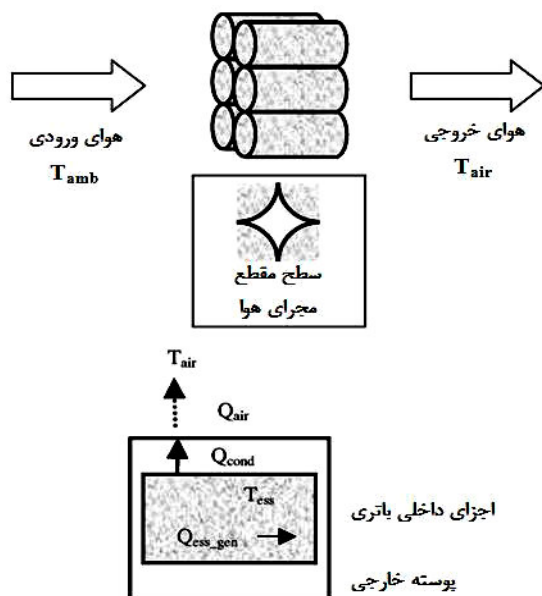
شکل ۸ سیکل رانندگی شهر تهران

خودروی موردنظر در این مقاله یک خودروی هیبرید موازی بر پایه خودروی ملی سمند است. به عبارت دیگر، یک موتور/ژنراتور الکتریکی و منبع ذخیره انرژی الکتریکی و سایر اجزای مورد نیاز به خودروی سمند اضافه شده است و یک خودروی هیبرید ایجاد گردیده است.

موتور احتراقی مورد نیاز در خودروهای هیبرید برقی، نسبت به موتور خودروهای معمولی کوچک‌تر می‌باشد. برای تعیین اندازه مناسب موتور احتراقی و موتور الکتریکی و همچنین تعداد باتری‌ها باید از یک روش بهینه‌سازی بهره برد. برای این منظور، نخست یک موتور الکتریکی AC ۷۵ کیلووات و باتری سرب اسیدی ۲۵ آمپر ساعت انتخاب شده است. سپس از یک روش ساینبدی اجزاء برای تعیین اندازه (حداکثر توان) مناسب هر جزء استفاده شده است. در این روش، نسبت اندازه مناسب به اندازه اولیه هریک از موتورهای احتراقی و الکتریکی به‌عنوان ضریب مقیاس در نظر گرفته شده است. ضرایب مقیاس موتور الکتریکی و موتور احتراقی و تعداد باتری‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. این سه کمیت به ترتیب برابر ۰/۲۳، ۰/۶۸ و ۱۴ به‌دست آمده است.

مشخصات خودروی هیبرید مورد نظر در جدول ۲ آمده است. برای کنترل خودروی هیبرید از یک کنترل کننده ژنتیک- فازی استفاده شده است. منطق به‌کار گرفته شده در طراحی این کنترلر فازی ایده تراز کردن بار می‌باشد. در روش تراز کردن بار، موتور احتراقی منبع اصلی تأمین توان است و از

تولید شده و گرمای منتقل شده، دمای باتری محاسبه می‌گردد. شکل ۱۰ نمای شماتیکی از این مدل را نمایش می‌دهد. معادلات مدل و شرح کامل آن در [۱۷] آمده است.



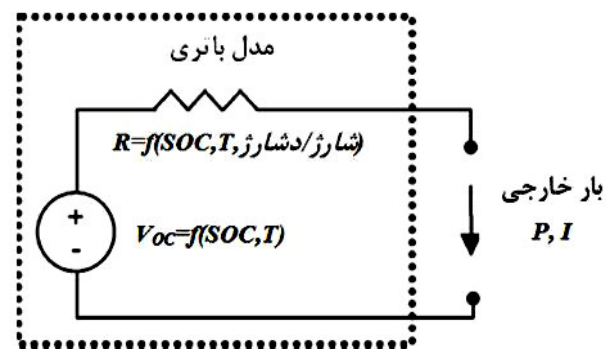
شکل ۱۰ مدل حرارتی ظرفیت متمرکز باتری [۱۷]

مدل باتری، توان مورد نیاز را به‌عنوان ورودی دریافت می‌نماید. توان تأمین شده توسط باتری و سطح شارژ خروجی‌های مدل را تشکیل می‌دهند.

۵-۲- مدل ابرخازن

در این مقاله، ابرخازن‌ها به‌صورت یک خازن ایده‌آل و یک مقاومت مدل می‌شوند [۱۳]. پارامترهای این مدل با دما و شدت جریان تغییر می‌کنند و از طریق جداول جستجو تعیین می‌شوند. شماتیک این مدل در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سطح شارژ ابرخازن از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. مدل حرارتی ظرفیت متمرکز برای مدلسازی حرارتی ابرخازن مورد استفاده قرار گرفته است.

$$SOC = \frac{V_{OC} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (5)$$



شکل ۹ مدل مقاومت داخلی باتری [۱۶]

پارامترهای این مدل به‌صورت جداول جستجو^۱ برحسب سطح شارژ و دما تعریف شده‌اند. مقاومت داخلی برای حالت‌های شارژ و دشارژ دارای جداول جداگانه‌ای است. سطح شارژ توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$SOC = \frac{Ah_{max} - Ah_{used} \eta_{coulomb}}{Ah_{max}} \quad (3)$$

در رابطه فوق SOC نشان‌دهنده سطح شارژ، Ah_{max} حداکثر ظرفیت باتری، Ah_{used} انرژی مصرف‌شده از باتری و $\eta_{coulomb}$ بازدهی کولمبی (بازده شارژ) باتری می‌باشد. انرژی مصرف‌شده باتری از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$Ah_{used} = \int_0^t Idt \quad (I > 0 \text{ discharge})$$

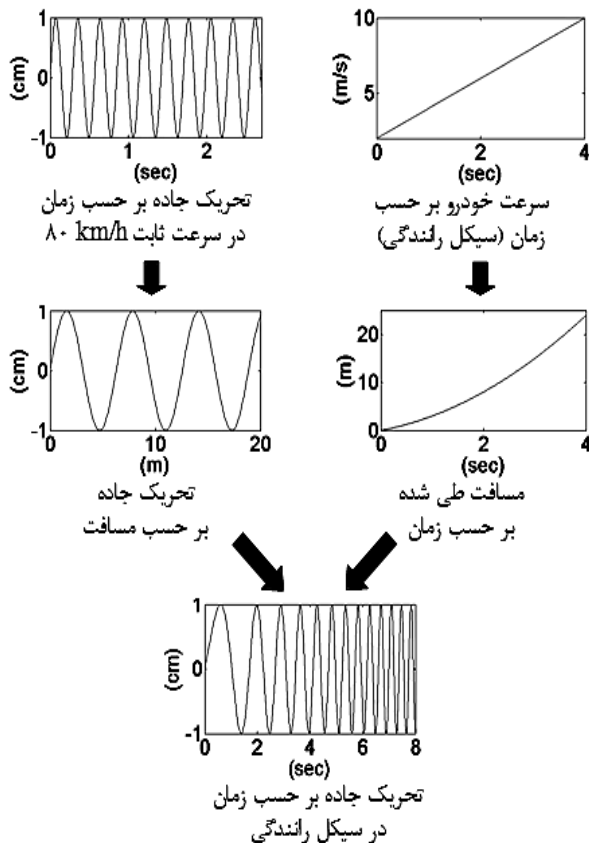
$$- \int_0^t \eta_{coulomb} Idt \quad (I < 0 \text{ charge}) \quad (4)$$

که در آن I نشان‌دهنده شدت جریان و t نشان‌دهنده زمان می‌باشد.

دمای باتری در هر لحظه توسط مدل حرارتی ظرفیت متمرکز محاسبه می‌شود. در این مدل، همه اجزای داخل پوسته باتری به صورت یک ماده یکنواخت و هم دما فرض می‌شود. گرمای تولید شده در باتری که به صورت اتلاف انرژی در مقاومت داخلی (IR^2) مدلسازی شده است، به سیال خنک‌کننده (هوا) منتقل می‌شود. با توجه به مقدار گرمای

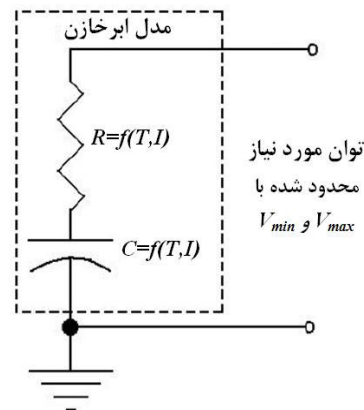
1. Look-up Tables

جاده بر حسب مسافت و از طرف دیگر، مسافت طی شده بر حسب زمان محاسبه می‌گردد. با ترکیب این دو داده، تحریک جاده بر حسب زمان در سرعت متغیر محاسبه می‌شود. در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که فرکانس تحریک جاده، با تغییر سرعت خودرو تغییر می‌نماید، به‌طوری که هرچه سرعت افزایش می‌یابد، فرکانس تحریک بیشتر می‌شود.



شکل ۱۲ تأثیر سیکل رانندگی بر تحریک جاده

در شکل ۱۳ روش شبیه‌سازی همزمان که در این مقاله به کار گرفته شده، نشان داده شده است. در این شکل، پیکان‌ها داده‌های ورودی و خروجی مدل‌ها را نمایش می‌دهند. اجزای اصلی خودروی هیبرید برقی داخل کادر خط‌چین قرار داده شده‌اند و تبادل داده‌ها بین مدل‌های آنها به‌طور ساده در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مدل ابرخازن [۱۳]

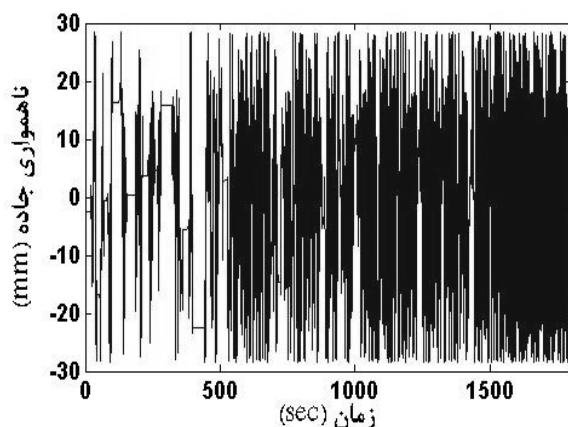
۶- شبیه‌سازی همزمان سیستم تعلیق فعال و

سیستم نیرو محرکه خودرو

به‌منظور بررسی تأثیر انرژی مصرفی و بازیاب‌شده سیستم تعلیق فعال بر مصرف سوخت و آلایندگی خودروی هیبرید برقی، ابزاری جهت شبیه‌سازی همزمان سیستم نیرو محرکه خودرو و سیستم تعلیق فعال مورد نیاز است. در شبیه‌سازی همزمان این دو سیستم سه نکته باید مورد توجه قرار گیرد:

- تحریک جاده معمولاً برای سرعت ثابت داده می‌شود. برای شبیه‌سازی سیستم تعلیق فعال در یک سیکل رانندگی، لازم است تأثیر سرعت متغیر بر تحریک جاده در نظر گرفته شود.
- سیستم تعلیق فعال با منبع ذخیره انرژی الکتریکی خودرو تبادل انرژی انجام می‌دهد.
- دینامیک سیستم تعلیق فعال بسیار سریع‌تر از دینامیک سیستم نیرو محرکه خودرو است.

چگونگی اعمال تأثیر سیکل رانندگی بر تحریک جاده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. در این شکل حالتی نشان داده شده است که سرعت خودرو با شتاب ثابت افزایش می‌یابد و خودرو بر روی جاده‌ای با سطح کاملاً سینوسی حرکت می‌نماید. تحریک جاده برای سرعت ثابت و سرعت خودرو بر حسب زمان معلوم می‌باشد. به این ترتیب از طرفی تحریک

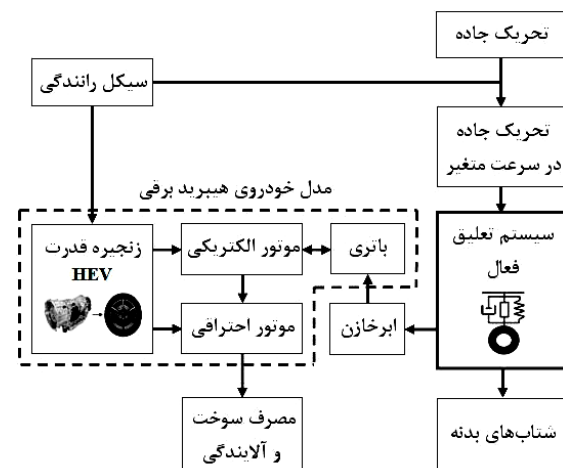


شکل ۱۴ تحریک جاده تصادفی در سیکل رانندگی تهران

۷- تحلیل نتایج

به منظور بررسی تاثیر به کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبریدی برقی و بازیابی انرژی آن بر مصرف سوخت و آلاینده‌گی خودروی هیبریدی، خودروی هیبریدی برقی در سه حالت مختلف شبیه‌سازی شده است. در حالت اول سیستم تعلیق به صورت غیرفعال عمل نموده و در نتیجه هیچ انرژی ای مصرف و بازیابی نمی‌نماید. در حالت دوم سیستم تعلیق به صورت فعال عمل می‌نماید و انرژی مصرف می‌کند، اما از قابلیت بازیابی انرژی استفاده نمی‌شود. در حالت سوم سیستم تعلیق به صورت فعال عمل می‌کند و از قابلیت بازیابی انرژی نیز استفاده می‌نماید. با استفاده از روش شبیه‌سازی همزمان، نتایج مربوط به سیستم تعلیق فعال به علاوه نتایج مربوط به اجزاء خودروی هیبریدی برقی و مصرف سوخت و آلاینده‌گی آن به دست آورده شده و مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای بررسی تاثیر سیستم تعلیق فعال بر راحتی سفر، در این مقاله از معیار ارائه شده در استاندارد ایزو ۲۶۳۱ [۱۸] استفاده شده است. در این روش شاخص راحتی سفر توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در رابطه (۶) W_i نشان‌دهنده فاکتور وزن‌دهی و a_i نشان‌دهنده مجذور مربعات شتاب (rms) برای باند اکتاو یک سوم i ام می‌باشد. علاوه بر این، هرگاه مانند مورد این مقاله، ارتعاش در بیش از یک محور صورت گیرد، مقدار نهایی مجذور مربعات شتاب وزن داده شده بر مبنای محورهای

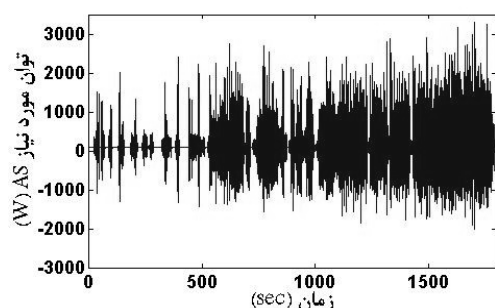


شکل ۱۳ روش شبیه‌سازی همزمان سیستم تعلیق فعال و سیستم نیرو محرکه خودرو

همانطور که در شکل ۱۳ پیداست، در این روش شبیه‌سازی، سیکل رانندگی و تحریک جاده ورودی‌های سیستم را تشکیل می‌دهند. ورودی سیستم تعلیق فعال از طریق ترکیب سیکل رانندگی و تحریک جاده محاسبه می‌شود. مدل سیستم تعلیق فعال در هر لحظه شتاب‌های وارد به بدنه و همچنین توان مورد نیاز سیستم را محاسبه می‌نماید. توان مورد نیاز در هر لحظه به مدل ابرخازن وارد می‌گردد و مدل ابرخازن توان مورد نیاز برای شارژ ابرخازن‌ها را محاسبه می‌نماید. این توان به همراه توان مورد نیاز برای سایر اجزاء الکتریکی خودرو به مدل باتری وارد می‌شود. با شبیه‌سازی خودروی هیبریدی برقی، مصرف سوخت و آلاینده‌گی خودرو توسط مدل موتور احتراقی محاسبه می‌گردد. در این شبیه‌سازی گام زمانی^۱ برابر ۰/۰۱s در نظر گرفته شده است تا برای دینامیک سریع سیستم تعلیق فعال مناسب باشد.

حاصل ترکیب سیکل رانندگی تهران با تحریک جاده تصادفی برای یکی از چرخ‌های جلو در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در قسمت‌هایی که سیکل رانندگی سرعت بالاتری دارد، فرکانس تحریک جاده که توسط چرخ‌ها احساس می‌شود، بالاتر می‌رود.

1. Time-step



شکل ۱۵ توان مورد نیاز سیستم تعلیق فعال

جدول ۴ انرژی مصرفی و قابل بازیابی سیستم تعلیق فعال

۲۶۰/۶	میانگین توان مصرفی (W)
۱۴۷/۶	میانگین توان قابل بازیابی (W)
۱۳۰/۰۹	انرژی مصرفی در طول سیکل (Wh)
۷۳/۶۵	انرژی قابل بازیابی در طول سیکل (Wh)
۵۶/۶۱	نسبت انرژی قابل بازیابی به مصرفی (%)

مصرف سوخت خودروی هیبرید در سه حالت بدون سیستم تعلیق فعال، با سیستم تعلیق فعال و با بازیابی انرژی در شکل ۱۶ رسم شده است. میزان انتشار گازهای آلاینده در طول شبیه‌سازی‌ها نیز در جدول ۵ آمده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با به‌کارگیری سیستم تعلیق فعال، مصرف سوخت خودروی هیبرید ۶/۲ درصد افزایش می‌یابد. اما با استفاده از قابلیت بازیابی انرژی، مصرف سوخت خودرو تنها ۲/۱۴ درصد افزایش پیدا می‌کند. انتشار گازهای آلاینده HC و CO نیز مانند مصرف سوخت، با به‌کارگیری سیستم تعلیق فعال افزایش می‌یابد، اما با استفاده از سیستم بازیابی انرژی، بخشی از آن کاسته می‌گردد. به عبارت دیگر، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بازیابی انرژی بخش قابل توجهی از افزایش مصرف سوخت و آلاینده‌گی ناشی از به‌کارگیری سیستم تعلیق فعال را جبران نموده و موجب کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی خودرو می‌گردد.

متعامد محاسبه می‌گردد. هرچه شاخص راحتی سفر کمتر باشد، به معنای راحتی سفر بیشتر است.

$$Ride\ index = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

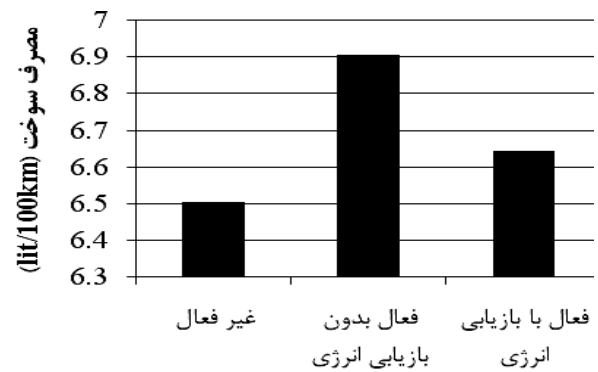
شاخص راحتی سفر و حداکثر تغییر طول سیستم تعلیق برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در جدول ۳ نمایش داده شده است. حداکثر تغییر طول سیستم تعلیق، در اینجا به عنوان معیاری از ایمنی در نظر گرفته شده است. این جدول نشان می‌دهد که سیستم تعلیق فعال قادر است راحتی سفر و ایمنی خودرو را به‌طور همزمان افزایش دهد.

جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیستم تعلیق فعال

حداکثر تغییر طول تعلیق عقب (mm)	حداکثر تغییر طول تعلیق جلو (mm)	شاخص راحتی سفر (m/s^2)	حالت سیستم تعلیق
۵۵/۸	۵۹/۶	۰/۲۵۰	غیر فعال
۳۹/۰	۳۹/۲	۰/۲۰۶	فعال

توان مورد نیاز سیستم تعلیق فعال در شکل ۱۵ رسم شده است. بخش مثبت این سیگنال توان مصرفی و بخش منفی آن توان قابل بازیابی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مقدار توان مورد نیاز سیستم تعلیق فعال نوسانات زیادی دارد و در بعضی لحظات به چند کیلووات می‌رسد. انرژی مصرفی و قابل بازیابی سیستم تعلیق فعال در طول سیکل تهران در جدول ۴ درج شده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که سیستم تعلیق فعال می‌تواند حدود ۵۷ درصد انرژی مصرفی خود را از طریق بازیابی انرژی جبران نماید. اما در حالتی که از قابلیت بازیابی انرژی استفاده نشود، انرژی قابل بازیابی به‌صورت گرما تلف می‌گردد.

باتری‌ها شروع به شارژ ابرخازن‌ها می‌نمایند و سطح شارژ ابرخازن افزایش می‌یابد. این نمودارها نشان می‌دهد که استفاده از سیستم ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی، نوسانات شدید بار را از باتری به ابرخازن منتقل می‌نماید. با توجه به اینکه باتری‌ها در برابر شارژ و دشارژ سریع و پی‌درپی به شدت آسیب پذیر هستند و توان ویژه پایینی دارند، استفاده از این سیستم ذخیره انرژی ترکیبی می‌تواند عمر و بازدهی باتری را افزایش دهد و توان مورد نیاز سیستم تعلیق فعال را به‌خوبی تامین نماید.

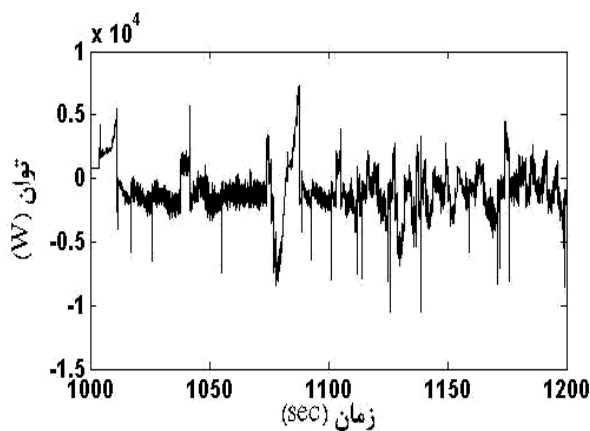


حالت سیستم تعلیق

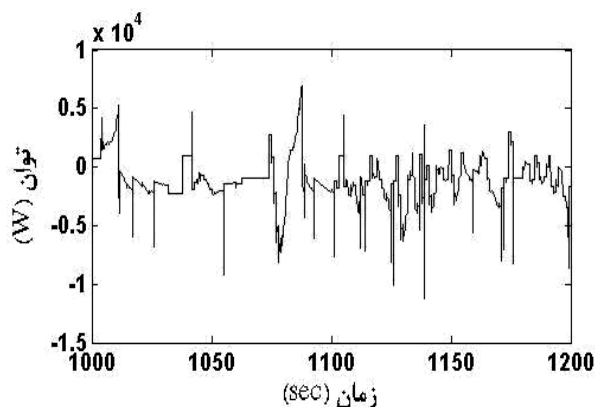
شکل ۱۶ مصرف سوخت خودروی هیبرید برقی

جدول ۵ انتشار گازهای آلاینده خودروی هیبرید برقی

حالت سیستم تعلیق	انتشار HC (g/km)	انتشار CO (g/km)	انتشار NOx (g/km)
غیر فعال	۰/۰۳۳	۱/۳۳۶	۰/۰۱۴
فعال بدون بازایی انرژی	۰/۰۳۷	۱/۷۴۹	۰/۰۱۳
فعال با بازایی انرژی	۰/۰۳۶	۱/۵۶۴	۰/۰۱۴



شکل ۱۷ توان وارد بر باتری خودروی هیبرید برقی بدون به‌کارگیری ابرخازن

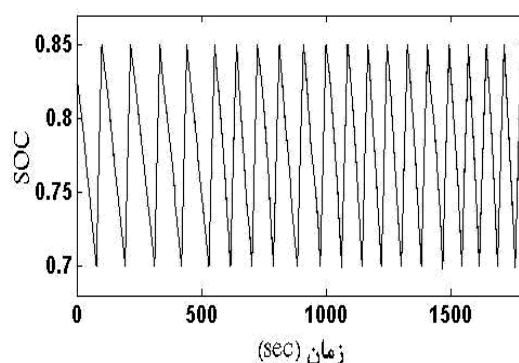


شکل ۱۸ توان وارد بر باتری خودروی هیبرید برقی با به‌کارگیری ابرخازن

برای مطالعه تاثیر به‌کارگیری سیستم ذخیره انرژی ترکیبی، یک بار دیگر شبیه‌سازی خودروی هیبرید برقی با سیستم تعلیق فعال بدون استفاده از ابرخازن انجام شده است. در این حالت، بار سیستم تعلیق فعال مستقیماً به باتری‌های خودرو وارد می‌گردد. در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ توان وارد بر باتری خودرو در بازه‌ای از زمان، در دو حالت رسم شده است. در شکل ۱۷ حالتی نشان داده شده است که بار سیستم تعلیق فعال مستقیماً به باتری خودرو وارد شده است. شکل ۱۸ مربوط به حالتی است که از سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای تامین بار سیستم تعلیق فعال استفاده شده است. همچنین تغییرات سطح شارژ ابرخازن در این حالت، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در طول شبیه‌سازی، ابرخازن‌ها ابتدا دشارژ می‌شوند تا به حد مینیموم شارژ برسند. در این لحظه

۹- منابع

- [1] Williams R. A., "Automotive active suspensions Part 1: basic principles", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, volume 211, number 6, 1997, pp 415-426.
- [2] http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp
- [3] Wendel G. R., Stecklein G. L., "A regenerative active suspension system", SAE Publication SP-861, Paper No. 910659, 1991, pp 129-135.
- [4] Hsu P., "Power recovery property of electrical active suspension systems", Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 11-16 Aug 1996, volume 3, pages 1899-1904.
- [5] Nakano K., Suda A., Nakadai S., "Self-powered Active Vibration Control Using a Single Electric Actuator", Journal of Sound and Vibration, No. 260, 2003, pp 213-235.
- [6] Stribrsky A., Hyniova K., Honcu J., Kruzcek A., "Energy Recuperation in Automotive Active Suspension Systems with Linear Electric Motor", IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 27-29 July, 2007, Athens, Greece.
- [7] Zhang Y., Huang K., Yu F., Gu Y., Li D., "Experimental Verification of Energy-regenerative Feasibility for an Automotive Electrical Suspension System", IEEE Int'l Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 13-15 Dec. 2007.
- [8] Montazeri-Gh M., Kashani-Azad M., "Energy regeneration of active suspension systems in hybrid electric vehicles", Proceedings of International Symposium on Advanced Vehicle Control, 9-13 september 2002, Hiroshima, Japan.
- [9] Ehsani, M., Gao, S. E., Emadi, A., Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, 2005.
- [10] Pay, S., Baghzouz Y., "Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles" IEEE Bologna Power Tech



شکل ۱۹ تغییرات سطح شارژ ابرخازن‌ها در طول شبیه‌سازی

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ایده به‌کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی ارائه شد و تاثیر استفاده از قابلیت بازیابی انرژی آن بر مصرف سوخت و آلایندگی خودروی هیبرید مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، عملگرهای فعال الکتریکی مدلسازی شد و روشی برای شبیه‌سازی همزمان سیستم تعلیق فعال و سیستم نیرو محرکه خودرو ارائه گردید. همچنین در این مقاله از یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی باتری و ابرخازن برای تأمین بار سیستم تعلیق فعال و اجزای الکتریکی خودرو استفاده شد.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نشان می‌دهد که در سیکل رانندگی شهر تهران و جاده تصادفی، با استفاده از امکان بازیابی انرژی در سیستم تعلیق فعال می‌توان حدود ۵۷٪ از انرژی مصرفی این سیستم را بازیابی نموده و به منبع ذخیره انرژی خودرو بازگرداند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با به‌کارگیری سیستم تعلیق فعال در خودروی هیبرید برقی، ابتدا مصرف سوخت آن حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد. اما با استفاده از سیستم بازیابی انرژی، مصرف سوخت تنها حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با به‌کارگیری سیستم ذخیره انرژی الکتریکی ترکیبی، نوسانات کمتری به باتری خودرو وارد می‌شود که این امر در افزایش عمر و بازدهی باتری تأثیر به‌سزایی دارد.

- [15] Montazeri-Gh, M., Poursamad, A., Ghalichi, B. "Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles" Journal of the Franklin Institute, No. 343, 2006, pp 420–435.
- [16] Johnson, V. H. "Battery performance models in ADVISOR", Journal of Power Sources, No. 110, 2002, pp 321–329.
- [17] Pesaran A. A., "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations", Journal of Power Sources, No. 110, 2002, pp 377–382.
- [18] ISO, "Mechanical Vibration and Shock–Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration," International Organization for Standardization, ISO 2631-1: 1997.
- Conference, 2003.
- [11] ASTM E950-98, "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference", American Society for Testing and Materials, 1998.
- [12] ISO, "Mechanical Vibration – Road Surface Profiles – Reporting of Measured Data", ISO 8608: 1995(E), International Organization for Standardization, 1995.
- [13] Brooker et al, "ADVISOR Documentation", National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2002.
- [14] Montazeri-Gh M., Naghizadeh M., "Development of Car Driving Cycle for City of Tehran", International Journal of Environment and Pollution (IJEP), Volume 3, No. 1, 2007.