ISME2013-1135

شبیه‌سازی سیستم ترمز بازیاب برای یک خودروی سمند هیبریدی الکتریکی

امیرحسین شامخی، مهیار کلانتری

[۱] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Shamekhi@kntu.ac.ir
[۲]کارشناس ارشد مهندسی مکانیک گرایش سیستم محرکه خودرو، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Mahyarkalantary@yahoo.com

چکیده

از آنجایی که خودروهای الکتریکی و هیبریدی الکتریکی تاثیر بسزایی بر کاهش مصرف سوخت دارند، این خودروها یقینا خودروهای برتر نسل آینده خواهند بود. یکی از ویژگی‌های اساسی خودروهای هیبریدی الکتریکی سیستم ترمز بازیاب آنها است. این سیستم ترمز می‌تواند بخشی از انرژی جنبشی خودرو که در هنگام ترمزگیری به صورت حرارت تلف می‌شود را بازیافت کند. به این صورت که موتور الکتریکی، که در حالت عادی وظیفه رانش خودرو را بر عهده دارد، در هنگام ترمزگیری به ژنراتور تبدیل شده و علاوه بر متوقف کردن خودرو، بخشی از انرژی جنبشی آن را که در ترمزگیری به هدر می‌رود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این انرژی به باتری منتقل می‌شود تا در مراحل بعدی برای رانش خودرو مورد استفاده قرار گیرد. سیستم ترمز بازیاب باعث می‌شود که انرژی کمتری برای رانش خودرو مصرف کنیم و در نتیجه میزان مصرف سوخت به نحو چشم‌گیری کاهش یابد. در این مقاله، یک خودروی هیبریدی الکتریکی سمند را که از سیستم ترمز بازیاب استفاده می‌کند مدل‌سازی کرده و عملکرد آن را در یک چرخه رانندگی درون‌شهری شبیه‌سازی می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترمز بازیاب میزان قابل توجهی از انرژی به هدر رفته در ترمزگیری را بازیافت کرده و تاثیر بسزایی بر کاهش میزان مصرف سوخت خودروهای هیبریدی الکتریکی دارد.

واژه های کلیدی

خودروی هیبریدی الکتریکی، سیستم ترمز بازیاب، مصرف سوخت

مقدمه

خودروهای هیبریدی الکتریکی به سبب کاهش چشمگیری که در میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها دارند توجهات بسیاری را در سال‌های اخیر به خود معطوف کرده‌اند. خودروی هیبریدی الکتریکی خودرویی است که از دو منبع انرژی برای تولید قدرت و رانش خودرو استفاده می‌کند. این دو منبع می‌توانند از میان موتورهای احتراق داخلی، موتورهای الکتریکی و پیل سوختی انتخاب شوند. از آنجایی که پیل سوختی تکنولوژی پیشرفته‌ای دارد و بسیار گران‌قیمت است، در این مقاله خودرویی را بررسی می‌کنیم که از یک موتور احتراق داخلی و یک موتور الکتریکی بهره می‌برد.

با توجه به این حقیقت که خودروهای هیبریدی الکتریکی علاوه بر موتور احتراق داخلی از یک موتور الکتریکی نیز استفاده می‌کنند، قابل تصور است که موتور احتراق داخلی آنها، که در واقع منبع اصلی مصرف سوخت و تولید آلاینده خودرو می‌باشد، می‌تواند بسته به نوع خودروی هیبریدی مدتی را خاموش باشد که این خود مشخصا مصرف سوخت و تولید آلاینده خودرو را کاهش می‌دهد.

از اجزای اساسی خودروهای هیبریدی الکتریکی می‌توان به موتور الکتریکی، موتور احتراق داخلی، ژنراتور الکتریکی، مدارهای الکترونیکی، واحدهای کنترل الکترونیکی پیشرفته، سیستم انتقال قدرت و منبع ذخیره انرژی الکتریکی که می‌تواند باتری یا ابرخازن باشد اشاره کرد. با توجه به نحوه اتصال و عملکرد هم‌زمان این اجزا، خودروهای هیبریدی الکتریکی که از این پس به اختصار خودروهای هیبریدی می‌نامیم به سه نوع خودروهای هیبریدی سری، موازی و سری-موازی تقسیم می‌شوند [۱] و [۲].

در این بین، خودروهای هیبریدی سری ساختاری ساده‌تر و ارزان‌تر از دو نوع دیگر دارند و از همین روی، در این مقاله یک خودروی هیبریدی سری انتخاب شده است. خودروهای هیبریدی سری در چرخه‌های رانندگی درون‌شهری که خودرو با توقف-حرکت-های متوالی مواجه است، به دلیل این که فعالیت غیر بهینه خودرو را به حداقل می‌رسانند و بازیافت انرژی از طریق سیستم ترمز بازیاب را به اجرا می‌گذارند، آلودگی بسیار کمی تولید می‌کنند و بازده بالایی دارند [۳].

سیستم ترمز بازیاب

سیستم ترمز مکانیکی خودروهای معمولی انرژی جنبشی خودرو را از طریق اصطکاک به حرارت تبدیل کرده و تلف می‌کند. در واقع با این کار انرژی حاصل از احتراق سوخت در خودرو که برای رانش آن مصرف می‌شود به هدر می‌رود. تحقیقات نشان می‌دهند که به طور میانگین حدود ۳۰ درصد از خروجی سیستم رانش خودروی معمولی در ترمزگیری تلف می‌شود [۴]. در خودروهای هیبریدی با استفاده از سیستم ترمز بازیاب می‌توان بخش بزرگی از این انرژی را بازیافت کرد و مصرف سوخت و تولید آلاینده خودرو را کاهش داد.

متوقف کردن یک خودروی ۱۵۰۰ کیلوگرمی با سرعت اولیه ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، چیزی حدود ۰/۱۶ کیلو وات ساعت انرژی را در چند ده متر مسافت به گرما تبدیل می‌کند. اگر این انرژی بازیافت

شود و برای غلبه بر نیروهای مقاوم (مقاومت آیرودینامیکی و مقاومت غلتشی) مصرف گردد، این خودرو چیزی حدود ۲ کیلومتر را بدون شتابگیری طی خواهد کرد.

نحوه عملکرد سیستم ترمز بازیاب به این شکل است که موتور الکتریکی خودرو که در حالت عادی وظیفه رانش خودرو را بر عهده دارد، در هنگام ترمزگیری طوری کنترل می‌شود که در سیکل معکوس عمل کرده و به یک ژنراتور تبدیل شود. این ژنراتور با تولید گشتاور منفی بر چرخ‌ها، علاوه بر اینکه به عملیات ترمزگیری کمک می‌کند، جریان الکتریکی نیز تولید می‌کند. این جریان الکتریکی در باتری خودرو ذخیره شده و در مراحل بعدی برای رانش خودرو مصرف خواهد شد. سیستم ترمز بازیاب در واقع بخشی از انرژی جنبشی خودرو که در ترمزگیری معمولی تلف می‌شود را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.

تخمین زده می‌شود که سیستم ترمز بازیاب می‌تواند حدود نیمی از انرژی به هدر رفته در ترمزگیری را بازیافت کند که با توجه به ویژگی‌های خودرو می‌تواند مصرف سوخت را ۲۵-۱۰ درصد کاهش دهد. اینکه چه مقدار انرژی را می‌توان بازیافت کرد به عوامل متعددی مثل وزن خودرو، سرعت، شتاب و استراتژی کنترلی سیستم ترمز بازیاب بستگی دارد. البته باید توجه داشت که در عملیات بازیافت نیز با اتلاف انرژی روبرو خواهیم بود. نکته مهم در مورد سیستم ترمز بازیاب این است که موتور الکتریکی (ژنراتور) توانایی فراهم آوردن گشتاور ترمزی لازم در ترمزگیری‌های شدید را ندارد و در نتیجه همواره باید یک سیستم ترمز مکانیکی نیز در خودرو وجود داشته باشد. سیستم ترمز بازیاب محدودیت‌های دیگری نیز دارد که مهمترین آنها این است که تنها بر محور راننده خودرو قابل اعمال است.

سیستم ترمز بازیاب از دو زیرسیستم تشکیل شده است: سیستم ترمز الکتریکی و سیستم ترمز مکانیکی. در طول عملیات ترمزگیری این دو زیرسیستم باید با هماهنگی کامل با یکدیگر عمل کنند. برای این کار سه استراتژی کنترلی کلی مطرح می‌شوند: ترمزگیری سری با احساس بهینه، ترمزگیری سری با بازیافت انرژی بهینه و ترمزگیری موازی. عملکرد این سه استراتژی از لحاظ بازیافت انرژی بسیار نزدیک به یکدیگر است [۵]. از بین این سه استراتژی، استراتژی موازی ساده‌تر، ارزان‌تر و در دسترس‌تر از دو استراتژی دیگر است و از لحاظ میزان بازیافت انرژی نیز کاملا قابل مقایسه با دو استراتژی دیگر است. به همین دلیل از این استراتژی برای کنترل سیستم ترمز بازیاب استفاده کرده‌ایم. در ادامه توضیح مختصری در مورد این استراتژی ارائه شده است. توضیحات تکمیلی در مورد این سه استراتژی در مراجع [۲] و [۵] آورده شده است.

در استراتژی موازی سیستم ترمز مکانیکی و سیستم ترمز الکتریکی به صورت زیر کنترل می‌شوند:

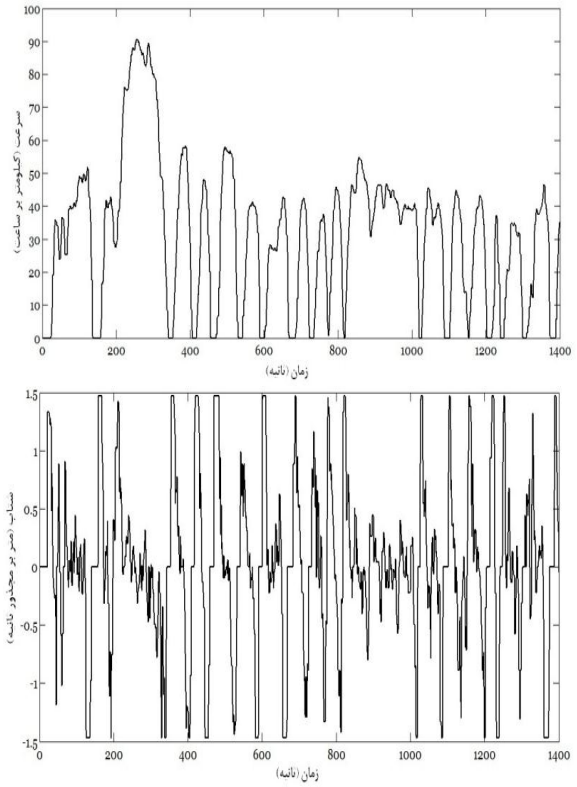
اگر شتاب منفی مد نظر راننده کوچکتر یا مساوی ۲ متر بر مجذور ثانیه باشد، تنها از سیستم ترمز الکتریکی استفاده می‌کنیم و سیستم ترمز مکانیکی هیچ نقشی در عملیات ترمزگیری نخواهد داشت.

اگر شتاب منفی بین ۲ تا ۷ متر بر مجذور ثانیه باشد، سیستم ترمز الکتریکی و سیستم ترمز مکانیکی مشترکا نیروی ترمز مورد نظر را فراهم می‌کنند.

اگر شتاب منفی بزرگتر از ۷ متر بر مجذور ثانیه باشد تمام نیروی ترمز را سیستم ترمز مکانیکی تولید می‌کند و سیستم ترمز الکتریکی هیچ نقشی در عملیات ترمزگیری نخواهد داشت.

هر چه نقش سیستم ترمز الکتریکی بیشتر باشد انرژی بیشتری بازیافت خواهد شد و موتور احتراق داخلی مدت طولانی‌تری خاموش می‌ماند و در نتیجه مصرف سوخت کمتری خواهیم داشت. در رانندگی درون‌شهری کمتر با ترمزگیری‌های شدید مواجه هستیم و شتاب منفی خودرو به ندرت بیشتر از ۲ متر بر مجذور ثانیه می‌شود. در نتیجه سیستم ترمز الکتریکی می‌تواند تقریبا تمام موارد ترمزگیری را به تنهایی به انجام برساند.

شکل (۱) نمودارهای سرعت و شتاب یک خودرو را بر حسب زمان در یک چرخه رانندگی FTP که یک چرخه رانندگی درون-شهری است نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است شتاب منفی هرگز به ۲ متر بر مجذور ثانیه نمی‌رسد. این امر نشان می‌دهد که تمام عملیات ترمزگیری توسط سسیستم ترمز الکتریکی انجام خواهد شد و در نتیجه در حالت ایده‌آل می‌توان تمام میزانی از انرژی که در ترمزگیری به هدر می‌رود را بازیافت کرد.



شکل ۱: نمودارهای سرعت و شتاب خودرو در چرخه رانندگی درون‌شهری FTP

مدل‌سازی

موتور الکتریکی و منبع ذخیره انرژی الکتریکی، دو بخش اساسی سیستم ترمز بازیاب خودروهای الکتریکی و هیبریدی الکتریکی می‌باشند. در این قسمت ابتدا موتور الکتریکی و باتری را مدل کرده و سپس به منظور ارزیابی تاثیر سیستم ترمز بر میزان مصرف انرژی، مدل دینامیکی یک خودروی هیبریدی را ارائه می‌دهیم. برای این کار از یک خودروی هیبریدی سری استفاده می‌کنیم. برای اینکه نتایج حاصل از شبیه‌سازی ملموس‌تر و قابل استفاده‌تر باشند، مشخصات یک خودروی سمند را در شبیه‌سازی به کار می‌گیریم. شبیه‌سازی در قالب نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام خواهد شد.

موتور الکتریکی

ما به روابطی نیازمندیم که گشتاور و جریان موتور را با خطایی قابل چشم‌پوشی مدل کنند و در عین حال حجم محاسباتی بالایی نداشته باشند. برای این کار روابط ریاضی حاکم بر موتور الکتریکی سه فاز را به شکل زیر ساده می‌کنیم [۶]:

$$V = L\frac{di}{dt} + Ri + k_v\omega \quad (۱)$$

$$T = k_t i \quad (۲)$$

$$T - T_L = j\dot{\omega} \quad (۳)$$

در این روابط V، R، i، L، k_v، ω، k_t، j، T_L و T به ترتیب: ولتاژ DC باس، مقاومت سیم‌پیچ، جریان موتور، اندوکتانس، ثابت ولتاژ القایی، سرعت دورانی موتور، ثابت گشتاور، لختی دورانی روتور، گشتاور بار و گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور می‌باشند.

همانطور که از رابطه (۲) مشخص است، اگر گشتاور تولیدی موتور مثبت باشد، جریان نیز مقداری مثبت خواهد داشت (ثابت گشتاور مقداری مثبت است). مثبت بودن جریان بدین معناست که موتور این جریان الکتریکی را از باتری می‌گیرد. اگر گشتاور موتور منفی باشد (ژنراتور)، جریان نیز منفی خواهد بود، و این یعنی موتور در حال تولید جریان است. جریان تولیدی موتور به باتری رفته و برای استفاده‌های آتی در آن ذخیره می‌شود.

باتری

در خودروهای هیبریدی الکتریکی باید یک منبع ذخیره انرژی الکتریکی داشته باشیم که در هنگام ترمزگیری بازیاب، و یا سایر شرایطی که انرژی الکتریکی اضافی داریم، این انرژی را ذخیره کند و در هنگام شتاب‌گیری، یا سایر شرایطی که به این انرژی نیازمندیم، انرژی الکتریکی را منتقل کند. با توجه به آنکه در بسیاری از شرایط ممکن است که موتور احتراق داخلی خاموش باشد، موتور الکتریکی باید با استفاده از انرژی منبع ذخیره انرژی الکتریکی، خودرو را به حرکت در آورد. بنابراین منبع باید ظرفیت بالایی داشته باشد.

ما از مدل باتری NiMH موجود در نرم افزار MATLAB/Simulink استفاده می‌کنیم. برای این کار باید مشخصه‌های مد نظر خود را به این مدل وارد کنیم. این مشخصه‌ها در جدول (۱) دیده می‌شوند:

جدول ۱: مشخصات باتری

ولتاژ نامی (V)	۲۴۰
ظرفیت (Ah)	۶/۵
سطح شارژ اولیه (%)	۷۵
مقاومت داخلی (ohm)	۰/۰۰۱۸۴۶۲
حداکثر ظرفیت (Ah)	۷

دینامیک خودرو

اولین گام در این مرحله بدست آوردن معادله‌ای است که نیروی رانش مورد نیاز خودرو را محاسبه کند. این نیرو باید بر نیروهای مقاوم وارد بر خودرو غلبه کرده و به خودرو شتاب بدهد. نیروی رانش کل، که سیستم رانش باید آن را تامین کند، برابر است با:

$$F_{total} = f_{roll} + f_{AD} + f_{grade} + f_{acceleration} \quad (۴)$$

در اینجا f_{roll} ، f_{AD} و f_{grade} ، به ترتیب، نیروی مقاوم غلتشی، نیروی دراگ آیرودینامیکی و مقاومت شیب‌پیمایی می‌باشد. برای رسیدن به شتابی معین، خودرو باید بتواند نیرویی مازاد بر این نیروها تولید کند. این نیرو $f_{acceleration}$ است. توجه شود که برای شتاب‌های مثبت، $f_{acceleration}$ نیز مقداری مثبت خواهد داشت، و برای شتاب‌های منفی، $f_{acceleration}$ منفی خواهد بود. نیروهای نامبرده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{roll} = f_r.M.g \quad (۵)$$

$$f_{AD} = \frac{1}{2}\rho.C_D.A.v^2 \quad (۶)$$

$$f_{grade} = M.g.\sin\alpha \quad (۷)$$

$$f_{acceleration} = M\frac{dv}{dt} = Ma \quad (۸)$$

در این روابط f_r ، M ، g ، ρ ، C_D ، A ، v ، α و a به ترتیب ضریب مقاومت غلتشی، جرم خودرو، شتاب جاذبه، چگالی هوا، ضریب آیرودینامیکی، سطح مقطع جلوی خودرو، سرعت خودرو، زاویه شیب جاده و شتاب خودرو است. نیروی رانش و سرعت خودرو در چرخها به گشتاور رانشی و سرعت زاویه‌ای تبدیل می‌شوند:

$$T_{wheel} = F_{total}R_{wheel} + I_{wheel}\dot{\omega}_{wheel} \quad (۹)$$

در رابطه فوق، T_{wheel} گشتاور رانشی، R_{wheel} شعاع چرخ، I_{wheel} لختی دورانی چرخ، و $\dot{\omega}$ شتاب زاویه‌ای چرخ می‌باشد. در خودروهای هیبریدی سری، به خاطر بازه سرعت گسترده موتورهای الکتریکی، می‌توان تنها از یک نسبت دنده برای تطابق لحظه‌ای گشتاور موتور (T_{motor})، و گشتاور رانشی (T_{wheel}) مورد نیاز استفاده کرد [۶]. این نسبت دنده به حداکثر سرعت موتور، حداکثر سرعت خودرو، و شعاع چرخ بستگی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$GR = \frac{(\omega_{motor})_{\max}}{v_{\max}}R_{wheel} \quad (۱۰)$$

همچنین گشتاور موتور و گشتاور چرخ با رابطه زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$T_{motor} = \frac{T_{wheel}}{GR} \quad (۱۱)$$

در نتیجه با استفاده از روابط (۹) و (۱۱) خواهیم داشت:

$$T_{motor} = \frac{F_{total}.R_{wheel} + I_{wheel}\dot{\omega}_{wheel}}{GR} \quad (۱۲)$$

برای خودروی مورد نظر ما، با در نظر گرفتن سرعت نهایی ۴۴/۴ متر بر ثانیه (۱۶۰ کیلو متر بر ساعت)، حداکثر سرعت موتور ۸۰۰۰ دور بر دقیقه، و شعاع چرخ ۳۲۶ میلی‌متر، نسبت دنده برابر خواهد بود با:

$$GR = \frac{8000\left(\frac{2\pi}{60}\right)}{44.4}0.326 = 6.15 \quad (۱۳)$$

در معادله (۱۲)، T_{motor} در واقع همان گشتاور بار یا T_L موجود در معادله (۳) می‌باشد. با محاسبه گشتاور بار از معادله (۱۳)، می‌توان گشتاور الکترومغناطیسی را از معادله (۳)، و سپس جریان الکتریکی موتور را از معادله (۲) محاسبه کرد. همانطور که اشاره شد اگر گشتاور تولیدی موتور مثبت باشد (موتور در حال رانش باشد)، جریان نیز مقداری مثبت خواهد بود. مثبت بودن جریان بدین معناست که موتور این جریان الکتریکی را از باتری می‌گیرد. اگر گشتاور موتور منفی باشد (ژنراتور در حال ترمزگیری باشد)، جریان نیز منفی خواهد بود، و این یعنی موتور در حال تولید جریان بوده و باتری را شارژ می‌کند.

شبیه‌سازی

برای بررسی میزان تاثیر سیستم ترمز بازیاب بر کاهش مصرف سوخت، با استفاده از معادلات ذکر شده، یک خودروی هیبریدی الکتریکی با مشخصات یک خودروی سمند را که از سیستم ترمز بازیاب موازی استفاده می‌کند در قالب نرم‌افزار MATLAB/Simulink مدل‌سازی می‌کنیم. لازم به ذکر است که سیستم انتقال قدرت خودروی سمند را با یک سیستم انتقال قدرت یک سرعته جایگزین کرده و یک موتور/ژنراتور الکتریکی سه فاز با توان ۴۰ کیلو وات و حداکثر گشتاور ۳۰۰ نیوتن متر به آن افزوده‌ایم. مشخصات موتور الکتریکی و خودروی سمند در جداول (۲) و (۳) آورده شده‌اند.

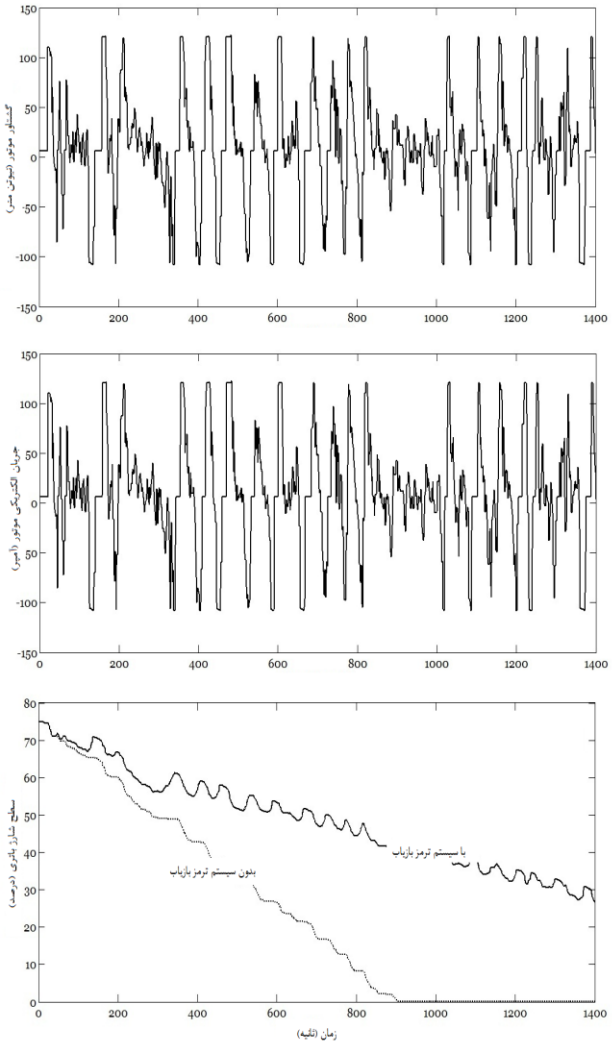
جدول ۲: مقادیر پارامترهای موتور/ژنراتور الکتریکی

j	۰/۰۰۸۲ $(kg.m^2)$
R	۰/۰۰۳ (ohm)
k_v	۱/۰۵ $(\frac{V}{rad/s})$
k_t	۱/۰۵ $(\frac{N.m}{A})$
L	۰/۰۰۳۹۷ (H)

جدول ۳: مقادیر پارامترهای دینامیک خودرو

C_D	۰/۳
f_r	۰/۰۰۸
I_{wheel}	۱/۷ $(kg.m^2)$
R_{wheel}	۰/۳۲۶ (m)
g	۹/۸۲ (m/s^2)
M	۱۵۰۰ (kg)
A	۱/۹۶۵ (m^2)

شکل (۲) گشتاور الکترومغناطیسی، جریان الکتریکی موتور و سطح شارژ باتری را برای خودروی مدل شده در یک چرخه رانندگی درون‌شهری FTP نمایش می‌دهد.



شکل ۲: گشتاور موتور، جریان الکتریکی موتور و سطح شارژ باتری در چرخه رانندگی درون‌شهری FTP

همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است وقتی که گشتاور تولیدی موتور مثبت باشد، جریان الکتریکی نیز مثبت است و موتور این جریان را از باتری خواهد گرفت و در نتیجه سطح شارژ باتری پایین می‌آید و زمانی که گشتاور منفی باشد (ترمزگیری بازیاب)، جریان نیز منفی خواهد بود و موتور باتری را شارژ کرده و در نتیجه

سطح شارژ باتری بالا می‌رود. خط پررنگ بیانگر سطح شارژ باتری با استفاده از سیستم ترمز بازیاب ، و خط نقطه‌چین سطح شارژ باتری را در حالتی نشان می‌دهد که از سیستم ترمز بازیاب استفاده نشده باشد. میزان کارایی سیستم ترمز بازیاب به وضوح در شکل (۲) نمایان است. بدون سیستم ترمز بازیاب، سطح شارژ باتری خیلی سریع از حداقل مجاز آن (۵۰ درصد) عبور کرده و در عرض تقریبا ۱۵ دقیقه به صفر می‌رسد. در این شرایط موتور احتراق داخلی خیلی سریع باید وارد عمل شده و باتری را شارژ کند، اما در صورت استفاده از سیستم ترمز بازیاب موتور احتراق داخلی مدت طولانی‌تری می‌تواند خاموش باشد که این امر مسلما به کاهش مصرف سوخت و همچنین کاهش تولید آلاینده منجر خواهد شد.

در بخش نهایی میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده خودروی سمند هیبریدی (سری) که از سیستم ترمز بازیاب استفاده می‌کند را در همین چرخه رانندگی درون‌شهری و با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR شبیه‌سازی کرده و نتایج را با میزان مصرف سوخت خودروی سمند هیبریدی که فاقد سیستم ترمز بازیاب است مقایسه می‌کنیم. نتیجه شبیه‌سازی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: میزان مصرف سوخت

	سمند هیبریدی بدون سیستم ترمز بازیاب	سمند هیبریدی با سیستم ترمز بازیاب	درصد بهبود (٪)
مصرف سوخت (لیتر در صد کیلومتر)	۷/۳۵۸	۶/۲۵۵	۱۴/۹۹

ارقام موجود در جدول (۴) بر تاثیر قابل توجه سیستم ترمز بازیاب در کاهش مصرف سوخت صحه می‌گذارد. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که میزان مصرف سوخت یک خودروی سمند هیبریدی که از سیستم ترمز بازیاب استفاده می‌کند نسبت به یک خودروی مشابه که از این سیستم استفاده نمی‌کند ۱۴/۹۹ درصد کمتر است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

سیستم ترمز بازیاب یکی از قسمت‌های مهم خودروهای هیبریدی امروزی است که می‌تواند بخش قابل توجهی از انرژی به هدر رفته در عملیات ترمزگیری را بازیافت کند. این امر به ما کمک می‌کند تا انرژی کمتری را برای رانش خودرو مصرف کنیم. انرژی مصرفی کمتر به معنای سوخت مصرفی کمتر و متعاقبا تولید آلاینده کمتر می‌باشد. خودروهای الکتریکی و هیبریدی با استفاده از ویژگی‌های فراوان خود از جمله سیستم ترمز بازیاب، مصرف سوخت و تولید آلاینده‌های خودرو را به طرز چشم‌گیری کاهش می‌دهند. با توجه به نگرانی‌های عمیق زیست محیطی و همچنین محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی در دسترس بشر، خودروهای الکتریکی و هیبریدی یقینا خودروهای برتر نسل بعد خواهند بود و کارخانجات خودروسازی دنیا اگر می‌خواهند که حرفی برای گفتن در بازارهای جهانی داشته باشند باید در این زمینه تحقیق و سرمایه‌گذاری کنند.

مراجع

[1] Emma Grunditz and Emma Jansson, 2009, Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart, Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, pp. 1-53.

[2] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao and Ali Emadi, 2010, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design, Second Edition, CRC Press, pp. 123-151.

[3] Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim and Arash Hassanpour Isfahani, 2010, Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle, Acta Polytechnica Hungarica Technology Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 51-71.

[4] Farhad Sangtarash, Vahid Esfahanian, Hassan Nezhati, Samaneh Haddadi, Meisam Amiri Bavanpour and Babak Haghpanah, 2008, Effect of Different Regenerative Braking Strategies on Braking Performance and Fuel Economy in a Hybrid Electric Bus Employing CRUISE Vehicle Simulation, SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, 2008-01-1561, pp. 828-836.

[5] Yimin Gao, Liping Chen and Mehrdad Ehsani, 1999, Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV". SAE Future Transportation Technology conference and Exposition, 1999-01-2910, pp. 1-7.

[6] Kai Zheng, Yu Yao, Tielong Shen, Kunihiko Hikiri and Masaakazu Sasaki, 2008, Modeling and Control of Regenerative Braking System in Heavy Duty Hybrid Electrical Vehicle, SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, 2008-01-1569, pp. 1-5.