

## طراحی بهینه و امکان‌سنجی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای موتورسیکلت برقی

مسعود مسیح‌طهرانی\*، استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

هدف این مقاله امکان‌سنجی طرح سیستم ذخیره ترکیبی برای موتورسیکلت برقی است. به این منظور به جای قیمت اولیه سیستم ذخیره انرژی، تعداد تعویض‌های مورد نیاز باتری ده ساله موتورسیکلت مورد توجه قرار می‌گیرد. قیمت ده ساله سیستم ذخیره شامل قیمت اولیه و قیمت باتری‌های تعویض شده در طول ده سال تعریف می‌شود. برای محاسبه تعداد تعویض‌های باتری مدل عمر آن باید استخراج شود. اضافه شدن ابرخازن علاوه بر اینکه توان قابل تولید لحظه‌ای باتری را افزایش می‌دهد، باعث تعدیل جریان عبوری و افزایش عمر باتری می‌گردد. افزایش عمر باتری تعداد تعویض‌های مورد نیاز آن و در نتیجه قیمت ده ساله سیستم ذخیره را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ابرخازن قیمت ده ساله سیستم ذخیره حدود ۱۰/۴ میلیون تومان بهبود می‌یابد، هر چند که قیمت اولیه موتورسیکلت حدود ۲/۵ میلیون تومان افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم ذخیره انرژی ترکیبی، عمر باتری، موتورسیکلت برقی، طراحی بهینه، مدل‌سازی قوای محرکه.

## Optimum Sizing of Hybrid Energy Storage System for an Electric Motorcycle Masoud Masih-Tehrani

M. MasihTehrani

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

## Abstract

In this research, the number of battery replacement during 10-years working time of e-motorcycle is concerned instead of the initial energy storage system price. The 10-years equivalent price of energy storage system is defined as initial price and the replaced battery prices during 10-years. The life model of battery is necessary for determination of the number of battery replacements during 10-years. The existence of UC in HESS improves the power specification, which increases acceleration performance and regenerative braking capacity. This moderates battery current and rises battery lifetime. In addition, the number of required battery replacements is decreased and the 10-years equivalent price of energy storage system will be reduced. The results show the optimum sized HESS has very good power specification. The 10-years equivalent price of HESS is about 3400 \$ lower than conventional ESS price, while the initial price of HESS is about 840 \$ higher.

**Keywords:** Hybrid Energy Storage System, Battery Lifetime, Electric Motorcycle, Optimum Sizing, Powertrain Modeling.

باتری و سیستم ذخیره انرژی یکی از چالش‌های توسعه هر وسیله برقی، از جمله موتورسیکلت است. قیمت بالای باتری سهم زیادی از قیمت کلی موتورسیکلت را تشکیل می‌دهد. اما بیش از آنکه قیمت اولیه باتری مهم باشد، تعداد تعویض‌های مورد نیاز باتری در طول مدت کارکرد آن است که به‌عنوان یک قطعه یدکی هزینه زیادی را به صاحب آن متحمل می‌کند [۵]. یکی از راه‌حل‌های نوین بهبود سیستم ذخیره انرژی انواع خودروهای الکتریکی ترکیبی کردن آن است [۶].

سیستم ذخیره انرژی ترکیبی<sup>۱</sup> شامل باتری و ابرخازن می‌باشد که نسبت به باتری تنها، دارای ظرفیت توان بیشتر و درعین حال قیمت بالاتری نیز است. بنابراین طراحی بهینه آن باید به‌نحوی باشد که از لحاظ عملکرد و قیمت هر دو برای مشتری موتورسیکلت مناسب باشد [۷]. تحقیق انجام‌شده روی عملکرد باتری و سیستم ذخیره ترکیبی نشان می‌دهد که عملکرد آنها در سیکل‌های رانندگی مختلف دارای تفاوت است [۸]. و در نتیجه برای هر نوع خودرو با سیکل رانندگی مشخص فرایند طراحی باید جداگانه انجام شود. مسیح‌طهرانی و همکاران [۹]. رویکرد مدونی را برای طراحی (سایزینگ) سیستم ذخیره ترکیبی برای یک اتوبوس هیبرید برقی سری پیشنهاد کرد. در این

## ۱- مقدمه

همزمان با بحران آلاینده‌گی شهرهای بزرگ و کمبود سوخت‌های فسیلی، جایگزینی خودروهای سنگین و پرمصرف با خودروهای کوچک‌تر برای حمل و نقل داخل شهری یکی از راه‌حل‌های مبارزه با این معضلات می‌باشد. خودروهای کوچک‌تری که با مصرف انرژی مناسب‌تر و اشغال فضای ترافیکی کمتر می‌تواند بهره‌وری ترافیک داخل شهری را بهبود بخشد. به‌خصوص نمونه‌های برقی انواع دوچرخه‌ها با حمایت‌های دولتی در شهرهای بزرگ و آلوده جهان رونق زیادی پیدا کرده‌است. نمونه‌های برقی بسیار کم صدا و بدون آلاینده‌گی هستند [۱].

در چین هر ده نفر یک نوع دوچرخه برقی دارند. دولت هند در سال 2013 مبلغ 4.13 میلیارد دلار برای حمایت از این صنعت در نظر گرفت [۲]. شهرداری تهران نیز محدودیت‌هایی برای تردد موتورسیکلت‌های بنزینی، به‌خصوص در نواحی مرکزی شهر، تصویب کرده‌است. برنامه‌ریزی شهرداری ورود یک میلیون موتورسیکلت برقی به ناوگان حمل و نقل تهران است [۳]. از سویی مسابقه طراحی و ساخت موتورسیکلت الکتریکی که توسط پژوهشکده شهید رضایی و دانشگاه صنعتی شریف از سال 1391 در حال اجرا می‌باشد تحقیقات دانشگاهی را در این عرصه گسترش داده‌است [۴].

<sup>1</sup> Hybrid Energy Storage System

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: masih@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۸

روی چرخ عقب حفظ شده و چرخ جلو مجهز به یک چرخ موتور<sup>۳</sup> شده‌است. شو و سو در سال ۲۰۰۶ [۲۳] ترکیب موتور بنزینی و برقی یک موتورسیکلت را به‌وسیله یک سیستم انتقال قدرت متغیر پیوسته (CVT)<sup>۴</sup> پیشنهاد کردند. تونگ و وو شون در سال ۲۰۰۷ [۲۴] در مورد تقویت یک موتورسیکلت ۵۰ سی‌سی به‌وسیله قوای محرکه برقی و تبدیل آن به یک موتورسیکلت با قدرتی معادل موتورهای ۱۰۰ سی‌سی طرحی ارائه کردند. همچنین سو و لو در سال ۲۰۱۰ [۲۵] روی سامانه مدیریت انرژی موتورسیکلت هیبرید تمرکز کردند. آسای و حبیب‌دوست در سال ۲۰۱۳ [۲۶] نمونه‌ای از موتورسیکلت هیبرید موازی از طریق جاده<sup>۵</sup> را طراحی، شبیه‌سازی و نمونه‌سازی کردند. چونگ و هونگ در سال ۲۰۱۴ [۲۷] نیز طرحی نوین برای هیبرید کردن قوای محرکه موتورسیکلت از طریق یک سیستم انتقال قدرت متغیر پیوسته برقی (e-CVT)<sup>۶</sup> ارائه کردند. کارهای تحقیقاتی نوینی نیز در مورد استفاده از پیل سوختی<sup>۷</sup> در موتورسیکلت‌های برقی نیز در حال انجام است [28-29]. در مجموع طرح‌های پیچیده‌تر قوای محرکه مانند هیبرید در مورد موتورسیکلت کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و در این بین ترکیب باتری و ابرخازن پتانسیل مطالعه زیادی دارد.

در مجموع، هدف این تحقیق امکان‌سنجی فنی-اقتصادی استفاده از سیستم ذخیره انرژی ترکیبی و اندازه‌بندی آن برای موتورسیکلت برقی است که فقدان آن در تحقیقات مشابه به چشم می‌خورد. با توجه به اینکه نمونه‌ای روی دوچرخه برقی پیاده‌سازی شده [۱۹] و همچنین قوای محرکه پیچیده‌تری نظیر موتورسیکلت‌های هیبرید و پیل سوختی [۲۹-۲۲] طراحی شده‌اند، مشکلی برای پیاده‌سازی طرح ترکیبی باتری و ابرخازن به چشم نمی‌خورد.

در این مقاله، موتورسیکلت برقی آویتا [۳۰] به‌عنوان یک مطالعه موردی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. به این منظور ابتدا مدل قوای محرکه موتورسیکلت در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMOLINK استخراج شده‌است. سپس سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای این موتور پیشنهاد و مدل‌سازی می‌شود. در ادامه تأثیر افزودن ابرخازن به سیستم ذخیره انرژی بررسی می‌گردد. برای بررسی عملکردهایی چون قیمت اولیه و ده ساله سیستم ذخیره انرژی، وزن موتورسیکلت، سرعت بیشینه و بُرد آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل‌سازی موتورسیکلت برقی

مشخصات موتورسیکلت برقی مورد مطالعه [۳۰] در جدول ۱ آمده‌است.

تحقیق، به‌جای قیمت اولیه سیستم ذخیره انرژی، تعداد تعویض‌های مورد نیاز باتری در طول عمر ده ساله موتورسیکلت مورد توجه قرار می‌گیرد. قیمت معادل ده ساله سیستم ذخیره انرژی شامل قیمت اولیه و قیمت باتری‌های تعویض‌شده در طول ده سال تعریف می‌شود [۱۰]. برای محاسبه تعداد تعویض‌های باتری مدلی علاوه بر اینکه توان قابل تولید لحظه‌ای آن اضافه‌شدن ابرخازن به باتری علاوه بر اینکه توان قابل تولید لحظه‌ای آن را افزایش می‌دهد (که باعث بهبود عملکردهای شتاب‌گیری و ترمز بازیاب می‌شود)، باعث تعدیل جریان عبوری از باتری و افزایش عمر آن می‌گردد. افزایش عمر باتری تعداد تعویض‌های مورد نیاز آن و در نتیجه قیمت معادل ده ساله سیستم ذخیره انرژی را کاهش می‌دهد.

یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد مناسب سیستم ذخیره ترکیبی سامانه مدیریت توان آن است [۱۱]. مهمترین وظیفه سامانه مدیریت توان در این مجموعه، توزیع توان برقی مناسب بین باتری و ابرخازن متناسب با سطح شارژ آنهاست. برخی از سامانه‌های مدیریت توان بر همین مبنا و با کمترین پیچیدگی به عملکردهای مناسبی دست یافته‌اند؛ نظر سامانه مدیریت توان باتری مینا [۱۲] و خازن مینا [۱۳] در این نوع سامانه‌ها اولویت تأمین توان با یکی از سیستم‌های ذخیره است و سیستم دیگر تنها در صورت نیاز فعال می‌شود. سامانه‌های پیچیده‌تری نظیر سامانه مدیریت توان بهینه [۱۴]، منطق فازی [۱۵]، شبکه عصبی [۱۶] و چند جمله‌ای [۱۵] در تحقیقات مختلف تدوین شده‌است. در این مقاله از یک سامانه مدیریت توان بر مبنای فیلتر موجک<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که در رساله مسیح طهرانی پیشنهاد و عملکرد مطلوب آن در مقایسه با دیگر انواع سامانه‌های مدیریت توان باتری و ابرخازن نشان داده شده‌است [۱۸].

در این مقاله تلاش می‌شود که با افزودن ابرخازن جریان عبوری از باتری تعدیل شود؛ در نتیجه تعداد تعویض‌های مورد نیاز آن در طول عمر موتورسیکلت کاهش پیدا کند. ترکیب باتری و ابرخازن روی دوچرخه برقی نیز پیاده‌سازی شده‌است [۱۹]. مسیح طهرانی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۰] طراحی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی بدون در نظر گرفتن حفظ مسافت قابل پیمایش دوچرخه برقی صورت گرفته و بنابراین ظرفیت باتری در سیستم ترکیبی بهینه کاهش پیدا کرده‌است. احتمالاً چنین طراحی باعث افت مسافت قابل پیمایش خواهد شد که در آن مقاله مورد بررسی قرار نگرفته‌است. منتظری و هاشمی زوزی [۲۱] نیز ترکیبی از باتری و ابرخازن به‌منظور بازیاب بهتر انرژی یک سیستم تعلیق فعال<sup>۲</sup> خودروی هیبرید برقی توسعه داده‌اند. در مورد استفاده از ابرخازن در موتورسیکلت برقی کمتر تحقیقی صورت گرفته و ترکیب باتری و ابرخازن نیز توجه زیادی را به خود جلب نکرده‌است. یکی از دلایل فقدان تحقیقات در این باره احتمال سنگینی (افت عملکرد) و افزایش قیمت می‌باشد که در این تحقیق تلاش در امکان‌سنجی فنی-اقتصادی این طرح است.

در مورد موتورسیکلت برقی، بیشتر از قوای محرکه برقی خالص استفاده شده‌است و کمتر به طرح‌های پیچیده‌تر مانند قوای محرکه هیبرید پرداخته شده‌است. از این بین می‌توان به تحقیق چن و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۲۲] در مورد مدل‌سازی و کنترل موتورسیکلت هیبرید برقی اشاره کرد. در طرح آنها قوای محرکه احتراقی با کمترین تغییرات

<sup>3</sup> Wheel motor

<sup>4</sup> Continuous Variable Transmission (CVT)

<sup>5</sup> Road parallel

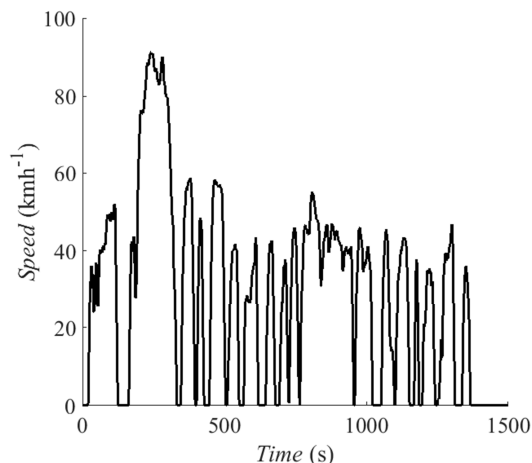
<sup>6</sup> Fuel cell

<sup>1</sup> Wavelet filter

<sup>2</sup> Vehicle Active Suspension System

می‌گیرد، بیشترین سرعت قابل دستیابی آن مشخص می‌شود. سیکل رانندگی نیز یک سیکل با سرعت ثابت 90 کیلومتر بر ساعت است که برای محاسبه قابل پیمایش موتورسیکلت در بزرگراه‌ها استفاده می‌شود. هر دو این سیکل‌ها در شروع خود یک بخش افزایش سرعت از صفر تا سرعت ثابت مورد نظر را دارند.

سیکل رانندگی دیگری که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، سیکل رانندگی مربوط به فرایند آزمون ایالات متحده<sup>2</sup> معروف به FTP می‌باشد [32]. این سیکل یکی از سیکل‌های متداول آزمون حرکت خودروهای سواری درون شهر می‌باشد (شکل 2).



شکل 2- سیکل رانندگی FTP امریکایی [14]

بلوک راننده (Driver) وظیفه تعقیب سرعت سیکل رانندگی را برعهده دارد. در این بلوک متناسب با سرعت فعلی موتورسیکلت ( $EBike\_spd\_act$ ) و سرعت مورد نظر سیکل رانندگی میزان فشردگی پدال‌های گاز ( $acc\_pedal$ ) و ترمز ( $brake\_pedal$ ) برحسب درصد تعیین می‌شود.

$$error = Drive\ Cycle - EBike\_spd\_act \quad (1)$$

در رابطه فوق مشاهده می‌شود که خطای رانندگی ( $error$ ) از تفاضل سرعت مورد نظر سیکل رانندگی و سرعت فعلی موتورسیکلت محاسبه می‌شود.

$$T\_dem = k_p \times error + k_i \int error dt + k_d error$$

طبق رابطه (2) روش کنترلی این بلوک PID<sup>3</sup> است (شکل 3). در این بلوک، با در نظر گرفتن علامت گشتاور درخواستی راننده ( $T\_dem$ ) تنها یکی از پدال‌های گاز یا ترمز فعال می‌شود. دلیل تقسیم مقدار گشتاور درخواستی راننده به گشتاور بیشینه ( $100 \times T_{dem}/T_{max}$ ) در این بلوک، بی‌بعد کردن و درصدی کردن مقدار گشتاور درخواستی راننده به صورت درصد فشردگی پدال ترمز است. به این ترتیب مقدار 100 درصد به معنای اعمال بیشترین گشتاور ممکن است.

در اینجا برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PID از روش زیگلر-نیکولز استفاده شده است؛ یعنی اعمال کنترل کننده تناسبی تنها و افزایش آن تا حد ناپایداری و بعد محاسبه ضرایب کنترل کننده از دستورالعمل‌های موجود. در ادامه با توجه به غیرخطی بودن سیستم کلی

جدول 1- مشخصات موتورسیکلت برقی مورد مطالعه [30]

سیستم	مشخصه	مقدار
موتور DC بدون جاروبک	توان نامی	6 کیلووات
کنترل کننده	توان بیشینه	12 کیلووات
	جریان بیشینه	150 آمپر
باتری لیتیوم فسفات آهن	ولتاژ بیشینه	80 ولت
	ظرفیت	30 آمپر ساعت
عمر تا 80 درصد عمق تخلیه	ولتاژ نامی	70 ولت
	عمر تا 80 درصد عمق تخلیه	2000 سیکل
شارژ کننده	جریان شارژ بیشینه	60 آمپر
	جریان شارژ نامی	30 آمپر
	جریان شارژ بهینه	10 آمپر
چرخ	مقاومت داخلی مجموعه باتری	0.015 اهم
	وزن مجموعه باتری	22.88 کیلوگرم
دینامیک خودرو	توان	500 وات
	مدت زمان شارژ	5~6 ساعت
سرنشین	شعاع چرخ	24 سانتی متر
	ممان اینرسی چرخ	0.1 کیلوگرم مترمربع
ممان اینرسی موتور الکتریکی	جرم کلی موتورسیکلت با سرنشین	250 کیلوگرم
	ممان اینرسی موتور الکتریکی	0.3 کیلوگرم مترمربع
ضریب اصطکاک لغزشی	ضریب اصطکاک لغزشی	0.003
	ضریب مقاومت هوا	0.4
چگالی هوا	چگالی هوا	1.23 کیلوگرم بر مترمکعب
	مساحت معادل روبروی موتورسیکلت	0.6 مترمربع

به عنوان مجموعه‌ای از معیارهای عملکردی، می‌توان مشخصات هدف مورد نظر موتورسیکلت برقی را به صورت زیر تعیین کرد:

- برد درون شهری (سیکل رانندگی FTP): 100 کیلومتر
- برد بیرون شهری (سرعت ثابت 90 کیلومتر بر ساعت): 50 کیلومتر
- سرعت بیشینه: 110 کیلومتر بر ساعت

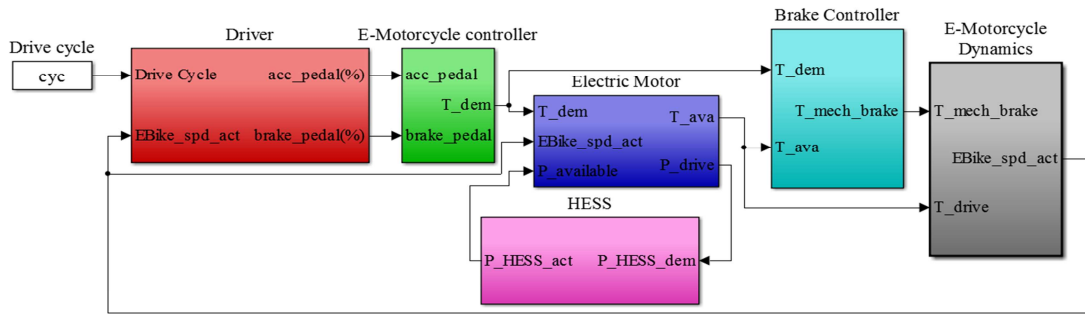
مدل سازی این موتورسیکلت در محیط MATLAB/SIMULINK انجام شده است (شکل 1). این مدل مشابه بستر نرم افزاری تدوین شده برای مدل سازی قوای محرکه می‌باشد [31] که تا کنون چندین نوع قوای محرکه معمولی، برقی، هیبرید برقی و هیبرید مکانیکی در آن مدل سازی شده است.

در این مدل بلوک «سیکل رانندگی»<sup>1</sup> وظیفه مدل سازی سیکل رانندگی را برعهده دارد. در این مقاله سه نوع سیکل رانندگی مورد استفاده قرار گرفته است. سیکل رانندگی اول یک سیکل با سرعت ثابت 200 کیلومتر بر ساعت است که برای محاسبه سرعت بیشینه موتورسیکلت استفاده می‌شود. وقتی موتورسیکلت در این سیکل مورد شبیه سازی قرار

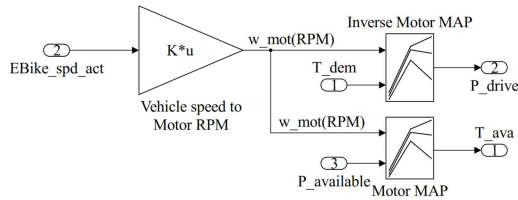
<sup>2</sup> US EPA Federal Test Procedure

<sup>3</sup> Proportional-Integral-Derivative controller

<sup>1</sup> Drive cycle

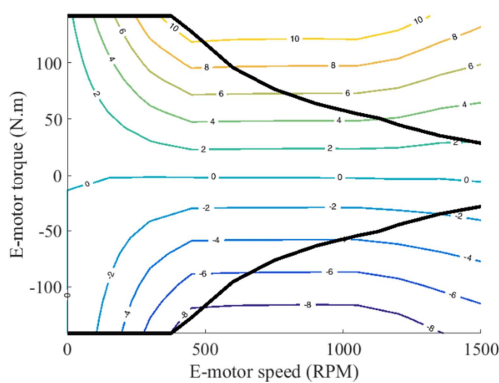


شکل ۲- مدل سازی قوای محرکه موتورسیکلت برقی در محیط MATLAB/SIMULINK



شکل ۵- بلوک موتور الکتریکی

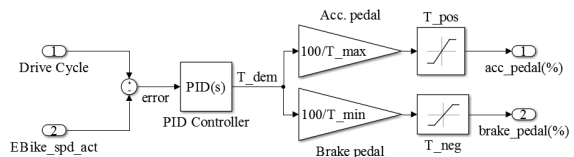
نگاشت موتور مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۶ مشاهده می‌شود. محور افقی این نگاشت دور موتور برحسب دوربردقیقه و محور عمودی آن گشتاور برحسب نیوتن متر است. دو خط تیره نشان داده شده در شکل نمودار بیشینه گشتاور موتور برحسب دور آن می‌باشد. مقادیر کانتورها توان مکانیکی خروجی موتور الکتریکی برحسب کیلووات می‌باشد. اطلاعات این نگاشت از نرم‌افزار ADVISOR استخراج شده‌است.



شکل ۶- نگاشت موتور الکتریکی

بلوک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی شامل مدل باتری، ابرخازن و کنترل‌کننده توزیع توان بین باتری و ابرخازن می‌باشد. در این بلوک راندمان‌های اجزا به دقت در نظر گرفته شده و سطح شارژ هر کدام از سیستم‌های ذخیره‌ساز به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود (شکل ۷).

ضرایب به‌دست آمده از این روش نیز نیاز به تنظیم نهایی دارند که با سعی و خطا انجام شده‌است.

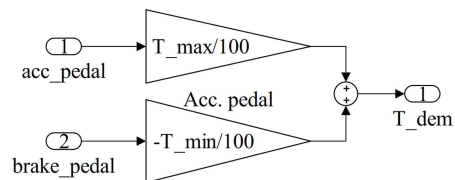


شکل ۳- بلوک راننده

بلوک کنترل‌کننده موتورسیکلت برقی (E-Motorcycle controller) فشردگی پدال‌ها را تبدیل به گشتاور مورد انتظار موتور الکتریکی می‌کند. این بلوک عکس محاسبات بلوک راننده را تکرار می‌کند (شکل ۴).

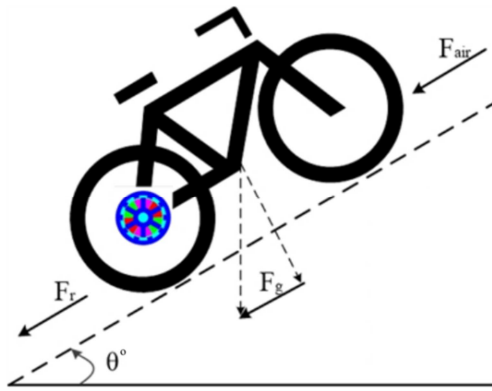
$$T_{dem} = acc\_pedal \times \frac{T_{max}}{100} - brake\_pedal \times \frac{T_{min}}{100}$$

دلیل تقسیم بر ۱۰۰ در رابطه (۳)، نحوه محاسبه میزان فشردگی پدال در بلوک قبل (محاسبه برحسب درصد) می‌باشد.



شکل ۴- بلوک کنترل‌کننده موتورسیکلت برقی

در بلوک موتور الکتریکی (Electric motor) سیگنال‌های گشتاور موردنیاز راننده ( $T_{dem}$ ) از کنترل‌کننده، سرعت فعلی موتورسیکلت ( $EBike\_spd\_act$ ) و توان الکتریکی تأمین‌شده ( $P_{available}$ ) توسط بلوک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی (HESS) دریافت می‌شود. از روی این سه سیگنال و نگاشت‌های راندمان موتور الکتریکی (که تابعی دوبعدی از دور و گشتاور آن می‌باشد)، گشتاور خروجی موتور ( $T_{ava}$ ) و توان الکتریکی مورد نیاز موتور ( $P_{drive}$ ) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که لزوماً تمامی گشتاور مورد انتظار کنترل‌کننده موتورسیکلت توسط موتور الکتریکی و همچنین تمامی توان مورد نیاز موتور الکتریکی توسط سیستم ذخیره انرژی تأمین نمی‌شود. دلیل این امر ممکن است کمبود قدرت موتور الکتریکی یا کمبود توان سیستم ذخیره انرژی الکتریکی باشد. در این صورت باید طراحی اجزای قوای محرکه متناسب با نیازهای موتورسیکلت بازبینی شود (شکل ۵).



شکل ۱۰- نیروهای مقاوم وارد بر موتورسیکلت

### ۳- مدل سازی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی

برای مدل سازی باتری و ابرخازن از یک مدل ساده منبع ولتاژ و مقاومت داخلی استفاده می شود. تحقیقات نشان می دهد که برای باتری های لیتیومی [۳۳] و ابرخازن ها [۳۴] این مدل دارای دقت مناسبی است. ابرخازن مورد استفاده در این مقاله مربوط به شرکت ماکسول<sup>۳</sup>، از نوع بوست کپ<sup>۴</sup> می باشد (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصات ابرخازن BMOD0083 [۳۵]

مقدار	مشخصه
80 فاراد	ظرفیت
2010 آمپر	جریان بیشینه لحظه ای
97.7 کیلووات	توان بیشینه لحظه ای
115 آمپر	جریان بیشینه پیوسته
5.6 کیلووات	توان بیشینه پیوسته
48.6 ولت	ولتاژ نامی
27 وات ساعت	انرژی
11 کیلوگرم	وزن

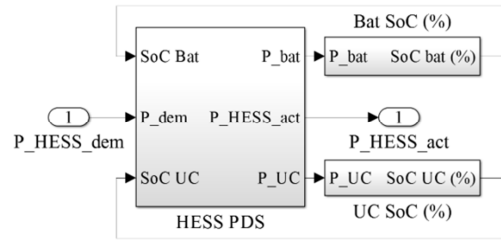
مدل عمر باتری یکی از حساس ترین بخش های این تحقیق است. «ظرفیت عمر<sup>۵</sup>» به عنوان میزان مجموع شارژ باتری که می تواند قبل از کم شدن ظرفیت نامی آن تا حد 80٪ تأمین کند تعریف می شود [۱۰]. بنابراین متغیر  $Ah$  (ظرفیت عمر) باتری موتورسیکلت برقی عبارت است از:

$$LC = Ah \times 0.8 \times 2000$$

که در آن  $Ah$  ظرفیت باتری و 2000 عمر سیکلی آن می باشد. میزان افت ظرفیت باتری در یک سیکل رانندگی مشخص  $(Q_{loss-DC})$  نیز عبارت است از:

$$Q_{loss-DC} = \frac{\int I dt}{LC}$$

که در آن  $I$  جریان عبوری از باتری است. مجموع افت ده ساله ظرفیت باتری  $(Q_{loss-10y})$  در رابطه (۷) نشان داده شده است. در این رابطه افت ظرفیت باتری در سیکل رانندگی بر مدت زمان آن  $(t_{DC})$  تقسیم می شود و در 3600 (برای تبدیل ثانیه به ساعت)، 8 (ساعات کاری مفید هر روز موتورسیکلت برقی)، 250

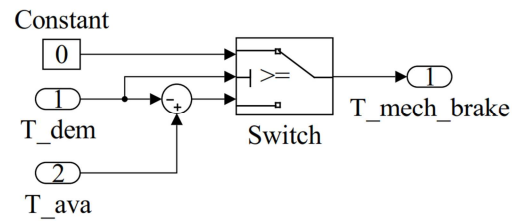


شکل ۷- بلوک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی

فرایند ترمزگیری موتورسیکلت برقی در دو بخش ترمز مکانیکی<sup>۱</sup> و ترمز بازتاب<sup>۲</sup> انجام می شود. اولویت گشتاور ترمزی با ترمز بازتاب است که باعث بهبود عملکرد موتورسیکلت از لحاظ مصرف انرژی می شود. بنابراین باقیمانده گشتاور ترمزی که توسط مجموعه برقی نتوانسته است جذب شود توسط بلوک کنترل کننده ترمز (Brake Controller) محاسبه و توسط ترمز مکانیکی  $(T_{mech\_brake})$  تأمین می شود.

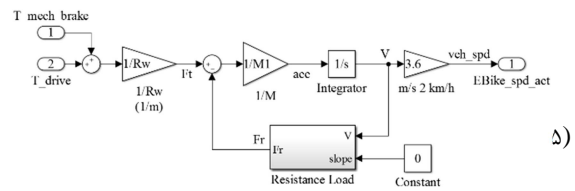
$$T_{mech-brake} = \begin{cases} 0 & T_{dem} \gg 0 \\ T_{ava} - T_{dem} & T_{dem} < 0 \end{cases}$$

رابطه (۴) نشان می دهد که اگر توان مورد نیاز خودرو مثبت باشد، نیازی به فعال شدن ترمز مکانیکی نیست (شکل ۸).



شکل ۸- بلوک کنترل ترمز

بلوک دینامیک موتورسیکلت برقی (E-Motorcycle Dynamics) وظیفه محاسبات دینامیک موتورسیکلت را برعهده دارد. به این بلوک گشتاورهای پیشران  $(T_{drive})$  و ترمزی وارد می شود. در نهایت سرعت موتورسیکلت برحسب برآیند نیروهای پیشران، ترمزی و مقاوم محاسبه می شود (شکل ۹).



شکل ۹- بلوک دینامیک موتورسیکلت

(۶) از سویی نیروهای مقاوم وارد بر موتورسیکلت شامل مقاومت هوا  $(F_{air})$ ، شیب جاده  $(F_g)$  و اصطکاک لغزشی  $(F_r)$  نیز در نظر گرفته می شود (شکل ۱۰).

<sup>3</sup> Maxwell technologies

<sup>4</sup> Boostcap

<sup>5</sup> Life capacity

<sup>1</sup> Mechanical Brake

<sup>2</sup> Regenerative Brake

**جدول ۳- تأثیر تعداد ماژول‌های ابرخازن بر تعداد تعویض‌ها و قیمت سیستم ذخیره**

تعداد ماژول‌های ابرخازن	ظرفیت ابرخازن (F)	تعداد تعویض‌های ده ساله باتری	قیمت اولیه سیستم ذخیره (میلیون تومان)	قیمت ده ساله سیستم ذخیره (میلیون تومان)
0	0	3	12.87	38.61
1	80	3	14.16	39.90
2	160	2	15.38	28.25
3	240	2	16.59	29.46
4	320	2	17.81	30.68
5	400	2	19.02	31.89
6	480	2	20.24	33.11
7	560	2	21.45	34.32
8	640	2	22.67	35.54
9	720	1	23.88	23.88
10	800	1	25.10	25.10

مقادیر ستون‌های جدول ۳ به‌صورت زیر از شبیه‌سازی مدل شکل ۱ محاسبه شده‌است:

- ستون سوم (تعداد تعویض‌ها): رابطه (۷)
- ستون چهارم (قیمت اولیه سیستم ذخیره انرژی (میلیون تومان): جدول ۱ و جدول ۲
- ستون پنجم (قیمت معادل ده ساله سیستم ذخیره انرژی): رابطه (۸)

ستون سوم جدول ۳ معرف تعداد تعویض‌های موردنیاز باتری در طول ده سال کارکرد موتورسیکلت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد تعویض‌های مورد نیاز زمانی که تنها باتری وجود دارد سه بار و با افزودن دو ماژول ابرخازن به دو بار و با افزودن نه ماژول ابرخازن به یک بار کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاهش جریان عبوری از باتری (به‌علت افزوده‌شدن ابرخازن) می‌باشد. مقادیر موجود در این جدول نشان می‌دهد که علی‌رغم افزوده‌شدن قیمت اولیه سیستم ذخیره انرژی موتورسیکلت (ستون چهارم جدول ۳) از مقدار 12.87 میلیون تومان بدون وجود ابرخازن به مقدار 15.38 میلیون تومان با وجود دو ماژول ابرخازن و 23.88 میلیون تومان با وجود نه ماژول ابرخازن، قیمت ده ساله سیستم ذخیره انرژی (ستون پنجم جدول ۳) از مقدار 38.61 میلیون تومان به مقدار 28.25 میلیون تومان با وجود دو ماژول ابرخازن و 23.88 میلیون تومان با وجود نه ماژول ابرخازن کاهش می‌یابد.

در جدول ۴ تأثیر تعداد ماژول‌های ابرخازن بر موتورسیکلت، شامل جرم آن، بیشینه سرعت، پیمایش در سرعت ثابت ۹۰ کیلومتر بر ساعت و پیمایش در سیکل FTP آورده شده‌است. مقادیر ستون‌های جدول ۴ به‌صورت زیر محاسبه شده‌است:

- ستون دوم (جرم موتورسیکلت): جدول ۱ و جدول ۲
- ستون سوم (بیشینه سرعت): آزمون بیشینه سرعت؛ در این آزمون سیکل رانندگی به‌صورت یک سیکل با سرعت ثابت 200 کیلومتر بر ساعت تعریف می‌شود. بعد از گذشت زمان مناسب سرعت موتورسیکلت به حد ثابتی می‌رسد که به‌عنوان سرعت بیشینه ثبت می‌شود.

(روزهای کاری مفید یک سال) و 10 برای محاسبه عمر ده ساله باتری ضرب می‌شود. مدت زمان ده سال به‌عنوان یک عمر معقول موتورسیکلت فرض شده‌است. در تحقیقات مختلف می‌توان این ضرایب را متناسب با تعریف مسأله تغییر داد.

$$Q_{loss-10y} = \frac{Q_{loss-DC}}{t_{DC}} \times 3600 \times 8 \times 250 \times 10$$

مقادیر کمتر از یک برای  $Q_{loss-10y}$  به معنای عدم نیاز به تعویض باتری در طول ده سال کارکرد موتورسیکلت در سیکل رانندگی مشخص است. بنابراین گردکردن  $Q_{loss-10y}$  رو به بالا<sup>۱</sup> منجر به معیار کمی می‌شود که هر مقدار بزرگتر از یک آن معرف یک بار تعویض مورد نیاز باتری در طول ده سال کارکرد موتورسیکلت در سیکل رانندگی خاص است.

قیمت سیستم ذخیره انرژی ترکیبی موتورسیکلت برقی در طول ده سال ( $Cost_{HESS-10y}$ ) از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه قیمت 12.879 میلیون تومان مربوط به قیمت تخمینی مجموعه باتری است که با احتساب هر دلار ۳۰۰۰ تومان [۳۶] و برحسب محصولات شرکت «کی باتری»<sup>۲</sup> محاسبه شده‌است [۳۷] با توجه به عمر قابل توجه، ابرخازن نیاز به تعویض در طول عمر ده سال موتور سیکلت ندارد. مبلغ 75 هزار تومان هزینه تقریبی تجهیزات اضافه‌ای است که در صورت افزوده‌شدن ابرخازن به سیستم ذخیره انرژی ترکیبی اضافه خواهد شد. متغیر  $\frac{FUC}{80}$  نشان‌دهنده تعداد ماژول‌های ابرخازن<sup>۳</sup>، 0.027 انرژی موجود در هر ماژول ابرخازن برحسب کیلووات ساعت و 45 میلیون تومان قیمت هر کیلووات ساعت ابرخازن [۱۰] است. قیمت‌های در نظر گرفته شده برای مجموعه ابرخازن مقداری دست بالا محاسبه شده که بتواند جبران هزینه‌های پیشبینی نشده را در بر داشته باشد. هرچند که هزینه‌های پیچیدگی و توسعه محصول تنها در صورت تولید انبوه قابل جبران است.

$$Cost_{HESS-10y} = \text{ceil}(Q_{loss-10y}) \times 12.870 + 0.075 + \frac{FUC}{80} \times 0.027 \times 45$$

#### ۴- طراحی بهینه سیستم ذخیره انرژی ترکیبی

در جدول ۳ تأثیر تعداد ماژول‌های ابرخازن بر تعداد تعویض‌های ده ساله موردنیاز باتری و قیمت‌های اولیه و ده ساله سیستم ذخیره انرژی (معمولی و ترکیبی) آورده شده‌است. در این جدول ستون اول معرف تعداد ماژول‌های ابرخازن موجود در سیستم ذخیره انرژی و ستون دوم ظرفیت ابرخازن مورد استفاده می‌باشد؛ به‌نحوی که در سطر اول موتورسیکلت مجهز به باتری (بدون حضور ابرخازن) بررسی شده و در سطرهای بعدی به ترتیب یک تا ده ماژول ابرخازن به سیستم ذخیره انرژی موتورسیکلت اضافه شده‌است.

<sup>۱</sup> در نرم‌افزار MATLAB گردکردن رو به بالای یک عدد اعشاری به‌وسیله تابع ceil انجام می‌شود.

<sup>۲</sup> K2 Battery

<sup>۳</sup> برای سلول باتری نوع LFP26650P

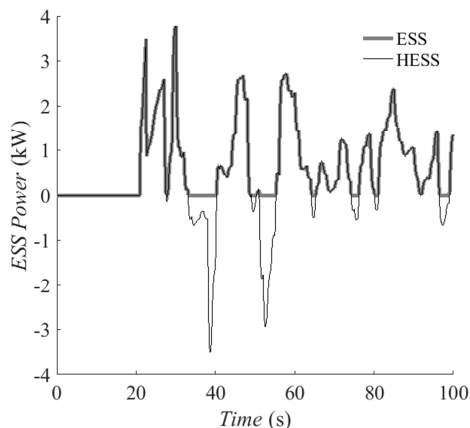
<sup>۴</sup> ظرفیت هر ماژول ۸۰ فاراد است.

در نهایت به نظر می‌رسد که با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴، ظرفیت ابرخازن 160 فاراد شامل دو ماژول ابرخازن (سطر سوم جدول) برای استفاده در سیستم ذخیره انرژی ترکیبی موتور سیکلت برقی طراحی بهینه را تشکیل می‌دهد. زیرا قیمت اولیه و قیمت ده ساله سیستم ذخیره انرژی آن هر دو مناسب است و از لحاظ عملکردهای دیگر مانند وزن و برد نیز قابل قبول می‌باشد.

## ۵- نتایج ترکیبی کردن سیستم ذخیره انرژی

در این بخش تأثیر ترکیبی کردن سیستم ذخیره انرژی بررسی می‌شود. در شکل ۱۱ توان سیستم ذخیره انرژی موتور سیکلت برقی در ۱۰۰ ثانیه ابتدایی سیکل رانندگی نمایش داده شده است. در این شکل نمودار خاکستری مربوط به سیستم ذخیره انرژی معمولی و نمودار سیاه مربوط به سیستم ترکیبی است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود سیستم ذخیره معمولی در جذب توان الکتریکی بازیاب در این بازه زمانی ضعیف عمل کرده است؛ در حالی که سیستم ذخیره ترکیبی به خوبی توانسته است توان الکتریکی بازیاب را جذب کند. این در حالی است که توان مورد نیاز در هر دو مورد یکی است. دلیل این پدیده بالا بودن سطح شارژ باتری در ابتدای حرکت موتور سیکلت است که در سیستم ذخیره ترکیبی مانع جذب انرژی بازیاب می‌شود. اما سیستم ذخیره ترکیبی به دلیل وجود ابرخازن توانسته است سهم خوبی از انرژی ترمزی را بازیاب کند. به بیان دیگر، باتری در حالت عادی (سطح شارژ متوسط) قابلیت تأمین تمامی توان‌های مورد نیاز موتور الکتریکی را دارد. اما در شرایط مرزی (سطح شارژ بسیار بالا یا بسیار پایین) وجود ابرخازن می‌تواند به تأمین توان کمک کند.

در شکل ۱۲ گشتاور ترمز مکانیکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قابلیت بهتر سیستم ذخیره انرژی ترکیبی باعث شده است که نیاز به ترمزگیری مکانیکی در این بازه نباشد و تمامی انرژی جنبشی موتور سیکلت توسط ترمز بازیاب جذب شود. اما ترمز مکانیکی در سیستم ذخیره معمولی بیشترین سهم گشتاور ترمزی را تولید می‌کند و سهم کمی از انرژی جنبشی ذخیره می‌شود. علاوه بر افزایش ظرفیت جذب انرژی، کمتر کارکردن ترمز مکانیکی در سیستم ترکیبی باعث افزایش عمر ترمز مکانیکی خواهد شد.



شکل ۱۱- توان سیستم ذخیره انرژی موتور سیکلت برقی در بخشی از سیکل رانندگی برای سیستم‌های ذخیره معمولی و ترکیبی

- ستون چهارم جدول ۴ (پیمایش در سرعت 90 کیلومتر بر ساعت) و ستون پنجم جدول ۴ (پیمایش در سیکل FTP): منظور بیشینه مسافتی است که موتور سیکلت برقی با یک بار شارژ کردن سیستم ذخیره انرژی (معمولی یا ترکیبی) با سرعت ثابت 90 کیلومتر بر ساعت یا در سیکل FTP می‌تواند طی کند.

جدول ۴- تأثیر تعداد ماژول‌های ابرخازن بر موتور سیکلت

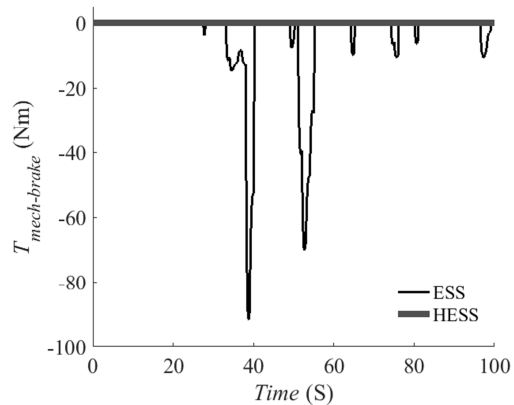
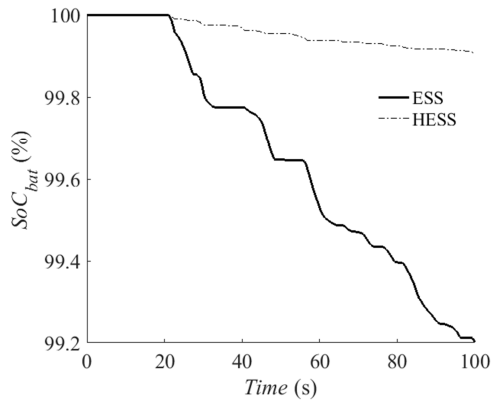
تعداد ماژول‌های ابرخازن	جرم موتور سیکلت (kg)	بیشینه سرعت (km/h)	پیمایش در سرعت ۹۰ (km)	پیمایش در سیکل FTP (km)
0	250	117.1	55.74	103.93
1	262.1	117.1	56.34	102.27
2	274.2	117.1	56.96	103.12
3	286.3	117.1	57.60	101.26
4	298.4	117.1	58.25	102.46
5	310.5	117.1	58.89	108.66
6	322.6	117.1	59.53	109.98
7	334.7	117.1	60.17	113.15
8	346.8	117.1	60.81	108.22
9	358.9	117.1	61.45	108.32
10	371	117.1	62.09	108.33

ستون دوم جدول ۴ معرف جرم مجموعه موتور سیکلت است که با افزودن ماژول‌های ابرخازن افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این افزایش وزن با افزایش قابلیت‌های سیستم ذخیره انرژی تا حد خوبی جبران می‌شود؛ زیرا عملاً سرعت بیشینه موتور سیکلت (ستون سوم جدول ۴) با افزایش ظرفیت ابرخازن تغییر محسوسی نمی‌کند. از سویی بُرد موتور سیکلت بر حسب افزایش ظرفیت ابرخازن با یک بار شارژ در آزمون سرعت ثابت 90 کیلومتر بر ساعت اندکی کاهش و در آزمون سیکل رانندگی FTP (شکل ۲) اندکی افزایش می‌یابد. دلیل این تغییرات تأثیر بیشتر وزن در آزمون سرعت ثابت و تأثیر بیشتر ظرفیت ترمز بازیاب در آزمون سیکل رانندگی داخل شهری است.

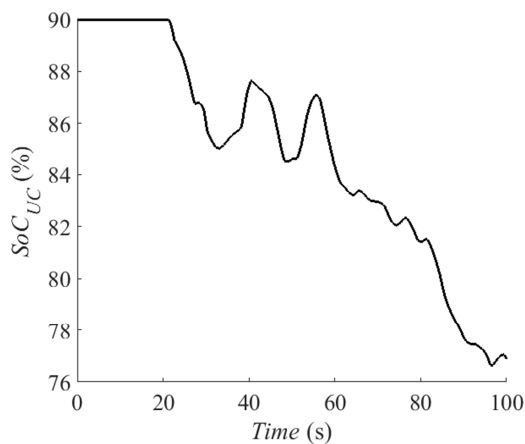
به‌عنوان ارزیابی نتایج و طراحی، می‌توان مقادیر سه ستون آخر جدول ۴ را با معیارهای عملکردی (مشخصات هدف مورد نظر موتور سیکلت برقی) بخش ۲ مقاله مقایسه کرد. ارزیابی نتایج در جدول ۵ آمده است. نتایج ارزیابی صحت نشان می‌دهد که طراحی انجام‌شده معیارهای عملکردی هدف را ارضا کرده است.

جدول ۵- ارزیابی صحت نتایج

معیار هدف	بیشینه سرعت (km/h)	پیمایش در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت (km)	پیمایش در سیکل (km)
سیستم ذخیره معمولی	۱۱۷/۱	۵۵/۷۳۶	۱۰۳/۹۳
سیستم ذخیره ترکیبی	۱۱۷/۱	۵۶/۹۶۴	۱۰۳/۱۲



شکل ۱۲- گشتاور ترمز مکانیکی موتورسیکلت برقی در بخشی از سیکل رانندگی برای سیستم‌های ذخیره معمولی و ترکیبی

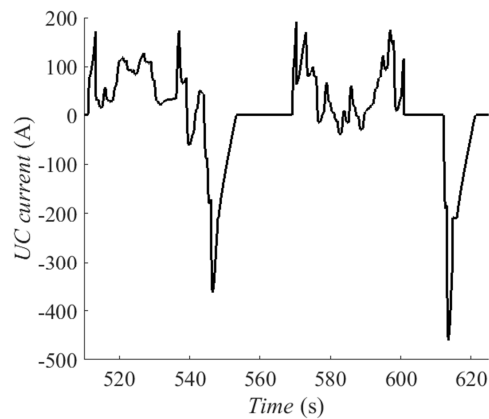
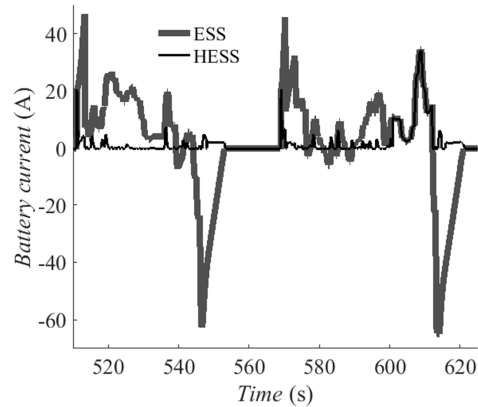


شکل ۱۳- (بالا) سطح شارژ باتری موتورسیکلت برقی؛ سیستم ذخیره معمولی (ESS) و سیستم ذخیره ترکیبی (HESS)؛ (پایین) سطح شارژ ابرخازن

در شکل ۱۳ سطح شارژ باتری مربوط به سیستم‌های ذخیره معمولی و ترکیبی در شکل بالا و سطح شارژ ابرخازن سیستم ذخیره ترکیبی در شکل پایین در بخشی از سیکل FTP نمایش داده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ابرخازن بخشی از انرژی مورد نیاز موتورسیکلت برقی را تأمین کرده‌است. بنابراین سطح شارژ باتری سیستم ترکیبی در این بازه زمانی کمتر از سطح شارژ باتری سیستم معمولی افت کرده‌است. به این ترتیب، ابرخازن موجود در سیستم ترکیبی هم در جذب و هم در تأمین انرژی به باتری سیستم ذخیره کمک کرده‌است. هر چند که با بالابردن وزن، تأثیر زیادی در میزان پیمایش موتورسیکلت ایجاد نکرده‌است.

در شکل ۱۴ جریان عبوری از باتری موتورسیکلت برقی در بخشی از سیکل FTP مربوط به سیستم‌های ذخیره انرژی معمولی و ترکیبی در شکل بالا و جریان ابرخازن سیستم ترکیبی در شکل پایین نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، وجود ابرخازن در سیستم ترکیبی باعث کاهش قابل ملاحظه جریان عبوری از باتری شده‌است. قله‌های مثبت و منفی جریان عبوری نیز بسیار تعدیل شده‌اند. در نتیجه عمر باتری بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده‌است که در جدول ۳ قابل مشاهده است.

(مثلاً افزودن تأثیر دما یا عمر تقویمی<sup>1</sup> میزان افت عمر افزایش یافته و تعداد تعویض‌ها و هزینه ده ساله افزایش می‌یابد و توجیه استفاده از سیستم ذخیره ترکیبی نسبت به این مدل عمر بیشتر می‌شود.



شکل ۱۴- (بالا) جریان عبوری از باتری موتورسیکلت برقی؛ سیستم ذخیره معمولی (ESS) و سیستم ذخیره ترکیبی (HESS)؛ (پایین) جریان عبوری از ابرخازن

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرایند طراحی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای موتورسیکلت برقی تدوین و برای یک نمونه به صورت بهینه طراحی شد. به این منظور، مدل موتورسیکلت برقی و سیستم ذخیره انرژی آن استخراج شد. در ادامه برحسب ظرفیت‌های مختلف ابرخازن موجود عملکردهای موتورسیکلت برقی مورد ارزیابی قرار گرفت. طراحی بهینه سیستم ذخیره انرژی ترکیبی نشان داد که با افزودن دو مازول ابرخازن به باتری‌های موتورسیکلت، علی‌رغم افزایش حدود 2.5 میلیون تومان قیمت اولیه سیستم ذخیره نسبت به باتری تنها (از 12.87 میلیون تومان به 15.38 میلیون تومان)، تعداد تعویض‌های مورد نیاز باتری در طول ده سال کارکرد موتورسیکلت کاهش پیدا کرده که باعث می‌شود قیمت ده ساله سیستم ذخیره انرژی حدود 10.4 میلیون تومان کاهش پیدا کند (از 38.61 میلیون تومان به 28.25 میلیون تومان). همچنین وزن موتورسیکلت 10٪ افزایش، سرعت بیشینه آن بدون تغییر، برد سرعت ثابت 90 کیلومتر بر ساعت آن 2٪ بهبود و برد سیکل FTP آن 1٪ کمتر شده‌است که این تغییرات در محدوده قابل قبولی می‌باشد. در تحقیقات آینده می‌توان از مدل‌های دقیق‌تر و کامل‌تر افت عمر باتری استفاده نمود. اما لازم به ذکر است که با بهبود مدل عمر باتری

## ۷- فهرست علائم

درصد فشردگی پدال گاز	<i>acc_pedal</i>
ظرفیت باتری	<i>Ah</i>
درصد فشردگی پدال ترمز	<i>brake_pedal</i>
قیمت ده ساله سیستم ذخیره انرژی ترکیبی	<i>Cost<sub>HESS-10y</sub></i>
سرعت موردنظر سیکل رانندگی	<i>Drive Cycle</i>
سرعت فعلی موتورسیکلت	<i>EBike_spd_act</i>
خطای رانندگی	<i>error</i>
ظرفیت ابرخازن	<i>F<sub>UC</sub></i>
مقاومت هوا	<i>F<sub>air</sub></i>
شیب جاده	<i>F<sub>g</sub></i>
اصطکاک لغزشی	<i>F<sub>r</sub></i>
ضریب مشتقی کنترل‌کننده	<i>k<sub>d</sub></i>
ضریب انتگرالی کنترل‌کننده	<i>k<sub>i</sub></i>
ضریب تناسبی کنترل‌کننده	<i>k<sub>p</sub></i>
ظرفیت عمر باتری	<i>LC</i>
افت ده ساله ظرفیت باتری	<i>Q<sub>loss-10y</sub></i>
افت ظرفیت باتری در سیکل رانندگی	<i>Q<sub>loss-DC</sub></i>
زمان سیکل رانندگی	<i>t<sub>DC</sub></i>
گشتاور فعلی ترمز بازیاب	<i>T<sub>ava</sub></i>
گشتاور ترمز مکانیکی	<i>T<sub>mech-brake</sub></i>
گشتاور موردنیاز راننده	<i>T<sub>dem</sub></i>
گشتاور بیشینه موتور الکتریکی	<i>T<sub>max</sub></i>
گشتاور کمینه موتور الکتریکی	<i>T<sub>min</sub></i>

## زیرنویس‌ها

سیکل رانندگی	<i>DC</i>
سیستم ذخیره انرژی ترکیبی	<i>HESS</i>
افت ظرفیت	<i>loss</i>
ابرخازن	<i>UC</i>

## ۸- مراجع

- [1] Fu J., The Role of Electric Two-Wheelers in Sustainable Urban Transport in China: Market analysis, trends, issues, policy options, *Sustainable Development United Nations*, pp. 1-17, 2013.
- [2] Ferris D., Electric Motorbikes In India: Six Questions For The CEO of Hero Electric, *Forbes*, 7 January 2013.
- [3] *One Million Electric Motorcycles in Tehran*, Tehran Office Website, www.tehran.ir, 2014.
- [4] *Design and Fabrication of Electric Motorcycle Competition*, www.imdc.ir, September 2015.
- [5] Masih-Tehrani M., Esfahanian V., and Hairi-Yazdi M.R., Energy Storage Hybridization for Lithium Battery Lifetime Improvement, *16th International Meeting on Lithium Batteries*, Jeju, Korea, June 17th to 22nd, 2012.
- [6] Dubal D. P., Ayyad O., Ruiz V., and Gómez-Romero P., Hybrid energy storage: the merging of battery and

<sup>1</sup> Calendar life

- [24] C. Tong, and W. Jwo, "An assist-mode hybrid electric motorcycle," *Journal of Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 61-68, 2007.
- [25] Hsu Y., and Lu S., Design and implementation of a hybrid electric motorcycle management system, *Applied energy*, Vol. 87, No. 11, pp. 3546-3551, 2010.
- [26] Asaei B., and Habibidoost M., Design, simulation, and prototype production of a through the road parallel hybrid electric motorcycle, *Energy Conversion and Management*, vol. 71, pp. 12-20, 2013.
- [27] Chung C., and Hung Y., Energy improvement and performance evaluation of a novel full hybrid electric motorcycle with power split e-CVT, *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 216-225, 2014.
- [28] De Luca D., Fragiaco P., De Lorenzo G., Czarnetski W. T., and W. Schneider, Strategies for Dimensioning Two - Wheeled Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Using Numerical Analysis Software, *Fuel Cells*, Vol. 16, No. 5, pp. 628-639, 2016.
- [29] Handa K., Yamaguchi S., Minowa K., and Mathison S., Development of New Hydrogen Fueling Method for Fuel Cell Motorcycle, *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, Vol. 6, paper No. 2017-01-1184, 2017.
- [30] "Avita Electric Motorcycle," <http://src.sharif.ir>, September 2015.
- [31] Esfahanian M., Safaei A., Nehzati H., Esfahanian V., and Tehrani M. M., Matlab-based modeling, simulation and design package for Electric, Hydraulic and Flywheel hybrid powertrains of a city bus, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 1001-1013, 2014.
- [32] FTP-75 (Federal Test Procedure). <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/ftp75.php>, September 2015.
- [33] Bazargan D., *Battery Storage Systems for Wind Farms: A Real-Time Hardware-in-loop Simulation Study*. LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
- [34] Burke A., Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles, *International Journal of Energy Resources*, Vol. 34, No. 2, pp. 133-151, 2010.
- [35] Maxwell ultracapacitor, *BMOD0083 P048 B01*. <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/products/48v-modules>, September 2015.
- [36] *Foreign Exchange Rates*. The Central Bank of Islamic Republic of Iran (CBI), [www.cbi.ir](http://www.cbi.ir), December 2015.
- [37] *The K2 Battery*. [www.k2battery.com](http://www.k2battery.com), January 2016.
- supercapacitor chemistries., *Chemical Society Reviews*, Vol. 44, No. 7, pp. 1777-90, Apr. 2015.
- [7] Schupbach R. M., Balda J. C., Zolot M., and Krmer B., Design Methodology of a Combined Battery-Ultracapacitor Energy Storage Unit for Vehicle Power Management, *Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC'03. 2003 IEEE 34th Annual*, 2003.
- [8] Masih-Tehrani M., Bazargan D., Hairi-Yazdi M. R., and Esfahanian M., Performance analysis of hybrid energy storage in different driving cycles, 2<sup>nd</sup> *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, IEEE, pp. 330-335, 2011.
- [9] Masih-Tehrani M., Ha'iri-Yazdi M. R., Esfahanian V., and Sagha H., Development of a hybrid energy storage sizing algorithm associated with the evaluation of power management in different driving cycles, *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 26, No. 12, pp. 4149-4159, 2012.
- [10] Masih-Tehrani M., Ha'iri-Yazdi M. R., Esfahanian V., and Safaei A., Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement, *Journal of Power Sources*, Vol. 244, pp. 2-10, 2013.
- [11] Allegre A. L., Bouscayrol A., and Trigui R., Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'09)*, IEEE, pp. 213-220, 2009.
- [12] Masih-Tehrani M., Hairi-Yazdi M. R., and Esfahanian V., Power Distribution Development and Optimization of Hybrid Energy Storage System, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 675-684, 2014.
- [13] Amjadi Z., and Sheldon S. Williamson, Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric vehicle energy storage and management systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 2, pp. 608-616, 2010.
- [14] Romaus C., Bocker J., Witting K., Seifried A., and Znamenshchykov O., Optimal energy management for a hybrid energy storage system combining batteries and double layer capacitors, *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*, pp. 1640-1647, 2009.
- [15] Li Q., Chen W., Li Y., Liu S., and Huang J., Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 514-525, 2012.
- [16] Moreno J., Ortúzar M. E., and Dixon J. W., Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks, *IEEE transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 2, pp. 614-623, 2006.
- [17] Camara M. B., Gualous H., Gustin F., Berthon A., and Dakyo B., DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications— Polynomial control strategy, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 2, pp. 587-597, 2010.
- [18] مسیح طهرانی، م. طراحی و مدیریت انرژی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای اتوبوس هیبرید الکتریکی سری، رساله دکتری تخصصی رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.
- [19] Sousa D. M., Costa Branco P. J., and Dente J. A., Electric bicycle using batteries and supercapacitors, *European Conference on Power Electronics and Applications, EPE*, 2007.
- [20] Masih-Tehrani M., Esfahanian V., Esfahanian M., Nehzati H., and Esfandiary M. J., Hybrid energy storage optimal sizing for an e-bike, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 1016-1025, Jun. 2015.
- [21] منتظری، م. و هاشمی زنوزی، س. تأثیر بازیابی انرژی سیستم تعلیق فعال بر مصرف سوخت و آلاینده‌های خودروی هیبرید برقی، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۱ شماره ۱، صص ۶۱-۷۵، ۱۳۹۰.
- [22] Chen B., Wu Y., Huang Y., and Huang C., Modeling and control of hybrid electric motorcycle with direct-driven wheel motor, *SAE Technical Paper*, . No. 2004-01-1054, 2004.
- [23] Sheu K., and Hsu T., Design and implementation of a novel hybrid-electric-motorcycle transmission, *Applied Energy*, Vol. 83, No. 9, pp. 959-974, 2006.