

## بهبود بازده انرژی و ارزیابی اقتصادی موتورسیکلت الکتریکی با حضور موتور چهار فاز AFPM و ترکیب ابرخازن و باتری

حامد فرهادی قریبه<sup>1\*</sup>، احمد صادقی یزدانخواه<sup>2</sup>، محمدرضا عزیزیان<sup>3</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری برق-قدرت، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
hamed.farhady@gmail.com

<sup>2</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
sadeghi@sut.ac.ir

<sup>3</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
azizian@sut.ac.ir

**چکیده:** توسعه وسایل نقلیه الکتریکی سبب توجه روزافزون به الکتروموتورها، منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و تجهیزات الکترونیک قدرت شده است. موتورسیکلت الکتریکی نیز به دلیل داشتن پتانسیل استفاده فراوان در بسیاری از کشورهای آسیایی دارای اهمیت است. امروزه چالش مهم وسایل نقلیه الکتریکی، چگالی انرژی کم باتری‌ها در مقایسه با سوخت‌های فسیلی است. یکی از اهداف اساسی این مقاله، انتخاب مناسب باتری، ابرخازن و افزودن مکانیزم شتاب-سریع به عنوان اساسی‌ترین بخش طراحی یک موتورسیکلت الکتریکی در راستای افزایش بازده انرژی و بهبود عملکرد آن است. انتخاب بهینه باتری با در نظر گرفتن هزینه، کارایی، افزایش مسافت پیموده شده طی یک بار شارژ، طول عمر، وزن، حجم و بازده می‌تواند یک گام مؤثر در راستای توسعه موتورسیکلت الکتریکی باشد. با توجه به پیشرفت‌های اخیر، در مقاله حاضر، امکان استفاده از باتری سدیم-نیکل کلراید به همراه ابرخازن و مکانیزم شتاب-سریع پیشنهاد و بررسی شده است. الکتروموتور شارمحوری مغناطیس دائم چهار فاز دارای مزایایی از قبیل بازیافت انرژی ترمز مولدی، ریپل کم گشتاور و قابلیت جاسازی آن در داخل تایر می‌باشد. استفاده از ابرخازن و افزودن مکانیزم شتاب-سریع با حضور الکتروموتور مذکور سبب بهبود بازده انرژی، افزایش مسافت پیموده شده (حدود 19%) و رضایت بیشتر کاربران موتورسیکلت الکتریکی می‌شود. برای بررسی صحت موارد مذکور، شبیه‌سازی‌های لازم بر روی یک موتورسیکلت الکتریکی انجام شده است. نتایج به دست آمده از لحاظ کاهش هزینه‌های اولیه و سالیانه استفاده از ترکیب باتری و ابرخازن مناسب، در برابر سایر ترکیب‌های منابع ذخیره انرژی ارزیابی گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** موتورسیکلت الکتریکی، باتری، ابرخازن، مدیریت هزینه، بهبود بازده انرژی.

## 1. مقدمه

کادمیم<sup>8</sup>، زینک-هوا<sup>9</sup>، آلومینیوم-هوا<sup>10</sup> و لیتیوم-یون<sup>11</sup> پرداخته است و از میان باتری‌های ذکر شده به بررسی مشخصات و ویژگی‌های سه نمونه مناسب و متداول آن‌ها (باتری‌های اسید-سرب بهبودیافته، نیکل-متال هیدرید و لیتیوم-یون) جهت کاربرد در خودروهای هیبریدی الکتریکی، بیشتر بحث و بررسی شده است.

در مرجع [9] اولین بار از چهار بسته باتری زینک-نیکل<sup>12</sup> دوازده ولتی با ظرفیت 22 آمپر ساعت و وزن تقریبی 6/8 کیلوگرمی (در مجموع 48 ولت، 22 آمپر ساعت و 27/2 کیلوگرم)، برای تأمین انرژی موتورسیکلت الکتریکی "FORTUNE 200e" استفاده شده است؛ البته این باتری بنا به دلایلی، از جمله طول عمر کم (300 سیکل) و بازده پایین (65%)، با اقبال عمومی چندانی جهت کاربرد به‌عنوان باتری مورد استفاده در سیستم حمل و نقل الکتریکی مواجه نشد.

مرجع [10] به بررسی و مقایسه سه نوع باتری اصلی (VRLA, Ni-MH, Li-Ion) در موتورسیکلت هیبریدی الکتریکی پرداخته و ارزیابی اقتصادی باتری‌ها نیز برای طی مسافت الکتریکی روزانه 25 کیلومتر طی یک بار شارژ با سیکل رانندگی<sup>13</sup> کشور هندوستان بررسی شده است. سیکل‌های رانندگی اولین بار به‌منظور فراهم کردن شرایط یک آزمون واقعی و عملی، برای تست عملکرد وسایل نقلیه طراحی شد. در کشورهای اروپایی، محققان و سازندگان تمایل دارند از سیکل‌های رانندگی ساده‌تری با دوره‌های شتاب ثابت و سرعت ثابت که متناسب با شرایط ترافیک شهری اروپاست، استفاده کنند؛ برای مثال، سیکل رانندگی ECE-15، یک سیکل استاندارد مناسب برای تست عملکرد وسایل نقلیه کوچک مانند وسیله نقلیه الکتریکی با منبع تغذیه‌شونده از طریق باتری است.

در این مرجع، اساس محاسبات برای موتورسیکلت هیبریدی الکتریکی در نظر گرفته شده و مسافت الکتریکی برابر 20 کیلومتر فرض شده است. این مقدار هرچند برای موتورسیکلت هیبریدی الکتریکی مناسب است، برای موتورسیکلت الکتریکی نمی‌تواند مناسب و راضی‌کننده باشد.

مرجع [11] نیز به بررسی و مقایسه باتری‌ها (VRLA, Ni-MH, Li-Ion) جهت انتخاب باتری مناسب برای کاربرد در موتورسیکلت هیبریدی الکتریکی، به مطالعه و بررسی باتری‌ها پرداخته است. اساس تحلیل برای انتخاب باتری و هزینه سالیانه آن در مرجع مذکور، براساس

براساس گزارش سازمان بین‌المللی انرژی، 22% از انتشار گاز آلاینده دی‌اکسیدکربن در سال 2012، مربوط به وسایل نقلیه است [1]. همچنین میزان تقاضا و تولید سوخت فسیلی از سال 1998 تا 2026، مطابق شکل (1) حکایت از کاهش میزان سوخت تولیدی از سال 2014 دارد؛ درحالی‌که همچنان بر تقاضای مصرف آن افزوده می‌شود [2]. راهکارهای مختلفی برای مقابله با تشدید آلودگی محیط‌زیست و کمبود انرژی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها، استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی<sup>1</sup> است. بازده زیاد، مسافت قابل پیمایش طولانی طی یک بار شارژ، ایمنی مطلوب و قیمت رقابتی با خودروهای احتراقی، از جمله ویژگی‌های دارای اهمیت برای خودروهای الکتریکی است.

موتورسیکلت الکتریکی<sup>2</sup> یکی از وسایل حمل و نقل با انرژی پاک است و در بسیاری از کشورها پتانسیل استفاده از آن زیاد است. وسایل نقلیه دوچرخ بیش از 50% کل وسایل نقلیه موتوری را در بسیاری از کشورهای آسیایی تشکیل می‌دهند. در سال 2000، در آسیا حدود 40 میلیون موتورسیکلت موجود بوده که این عدد با نرخ رشد سالیانه 18% در حال افزایش است [3-5].

در مرجع [6] که می‌توان از آن به‌عنوان اولین مقاله ارائه‌شده در مجله معتبر *IEEE Industry Application* در زمینه موتورسیکلت الکتریکی نام برد، از باتری اسید-سرب<sup>3</sup> با ولتاژ 96 ولت و ظرفیت 12 آمپر ساعت برای ذخیره‌سازی و تأمین انرژی الکتریکی لازم موتورسیکلت الکتریکی استفاده شده است که از آن زمان (سال 1996) تاکنون، باتری اسید-سرب بنا به دلایلی، از جمله قیمت ارزان و فراوانی در بازار، مشتریان و مصرف‌کنندگان خاص خود را دارد. با توجه به پیشرفت تکنولوژی ساخت انواع خانواده‌های باتری اسید-سرب و تکامل اطلاعات دقیق شارژ و دشارژ آن‌ها که در مرجع [7] اشاره شده است، هنوز هم سازندگان آن‌ها دلایل منطقی خود را برای کاربردی بودن این باتری‌ها در صنعت حمل و نقل الکتریکی ارائه می‌کنند.

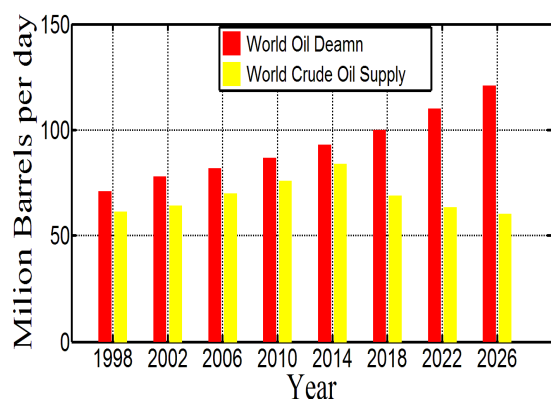
با توجه به نقش بسیار مهم باتری‌ها در توسعه وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی الکتریکی، مرجع [8] به بررسی انواع باتری‌های موجود در بازار در سال 2006، از قبیل باتری‌های اسید-سرب بهبودیافته<sup>4</sup>، زینک-نیکل، نیکل-متال هیدرید<sup>5</sup>، سدیم-سولفور<sup>6</sup>، سدیم-نیکل کلراید<sup>7</sup>، نیکل-

8. Nickel-Cadmium  
9. Zn/Air  
10. Al/Air  
11. Lithium-ion  
12. Ni-Zn  
13. Driving Cycle

1. Electric Vehicles  
2. Electric Motorcycle  
3. Lead-acid  
4. Valve Regulated Lead-acid  
5. Nickel-metal Hydride  
6. Sodium/sulfur  
7. Sodium-Nickel Chloride

حفاظتی اضافه و قابلیت دشارژ بدون کاهش عمر، نسبت به عملکرد باتری‌های استاندارد دیگر، از طریق انجام شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم افزار متلب (MATLAB) بررسی و مقایسه شده است.

انتخاب ابرخازن مناسب برای تأمین انرژی لازم در وضعیت کارکردی عادی و وضعیت کارکردی شتاب-سریع با استفاده از محاسبات و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب در راستای تکامل طراحی و انتخاب منابع ذخیره‌ساز انرژی سریع، بررسی شده است. در نهایت، به امکان تجاری‌سازی، صرفه اقتصادی و کارایی فنی باتری زبرا و ابرخازن در موتورسیکلت الکتریکی پرداخته شده است.



شکل (1): پیش‌بینی عرضه و تقاضای نفت در بازار جهانی

## 2. معادلات دینامیکی موتورسیکلت الکتریکی

شکل (2) نیروهای اعمال شده بر یک موتورسیکلت الکتریکی از قبیل نیروی آیرودینامیکی، نیروی غلطشی موتورسیکلت و نیروی گرانش را نشان می‌دهد. نیروی لازم در چرخ موتورسیکلت از رابطه زیر به دست می‌آید [10]:

$$F_{wheel} = F_{aero} + F_{roll} + F_{grad} \quad (1)$$

که در آن،  $F_{aero}$  نیروی آیرودینامیکی،  $F_{roll}$  نیروی غلطشی و  $F_{grad}$  نیروی گرانشی است و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{aero} = 0.5 \rho C_d A_f V^2 \quad (2)$$

$$F_{roll} = C_{rr} m g \quad (3)$$

$$F_{grad} = m g \sin \alpha \quad (4)$$

$\rho$  چگالی هوا ( $1/23 \text{ kg.m}^{-3}$ ),  $C_d$  ضریب درگ آیرودینامیکی ( $0/9$ ),  $A_f$  مساحت جلوی موتورسیکلت ( $0/6 \text{ m}^2$ ),  $V$  سرعت موتورسیکلت ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $C_{rr}$  ضریب مقاومت غلطشی ( $0/014$ ),  $m$  جرم کل موتورسیکلت ( $\text{kg}$ ),  $g$  شتاب گرانش ( $\text{m.s}^{-2}$ ) و  $\alpha$  زاویه شیب است [14].

سیکل رانندگی استاندارد هند و سیکل رانندگی واقعی صورت گرفته است. استفاده از باتری نیکل-متال هیدرید در مرجع مذکور، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر معرفی شده است. هرچند باتری نیکل-متال هیدرید جهت استفاده در موتورسیکلت هیبریدی مناسب است، طول عمر آن در صورت دشارژ کامل باتری در خودروهای الکتریکی، به شدت کاهش می‌یابد.

در مرجع [12]، با توجه به پیشرفت‌های اخیر باتری‌ها، به صورت عملی امکان استفاده از باتری سدیم-نیکل کلراید (که به نام زبرا<sup>1</sup> نیز مشهور است) در یک اتومبیل الکتریکی بررسی شده و از نظر هزینه و سایر ویژگی‌های آن، با باتری‌های دیگر مقایسه شده است. استفاده از باتری زبرا در اتومبیل‌های الکتریکی، به دلیل چگالی توان ضعیف آن‌ها و وزن زیاد خودرو، مستلزم به کارگیری مقدار زیادی بانک خازنی است که موجب افزایش هزینه و اشغال فضای زیادی در خودرو می‌شود.

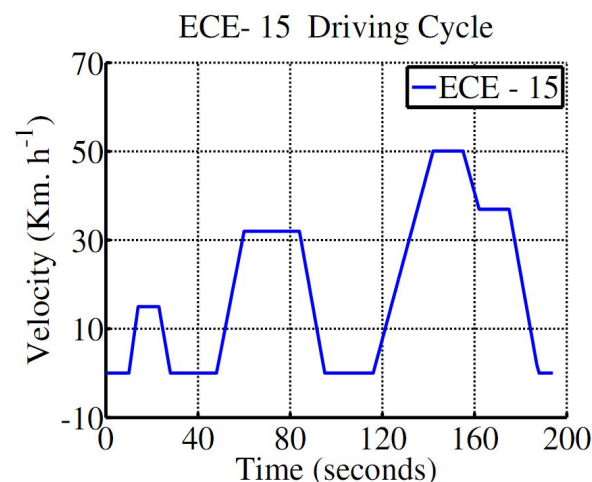
یکی از مسائلی که امروزه مورد توجه کارشناسان خودروسازی قرار گرفته، ساخت و طراحی موتورهای بهینه یا افزودن وسایلی است که باعث افزایش راندمان و توان در خودروها می‌شود. امروزه استفاده از توربوشارژرها و سوپرشارژرها در وسایل نقلیه احتراقی، موجب افزایش توان خروجی موتور احتراقی، همچنین افزایش شتاب و سرعت لحظه‌ای وسیله نقلیه شده است؛ در حالی که چنین ایده‌ای تاکنون در وسایل نقلیه الکتریکی مطرح نبوده است. در پژوهش حاضر، استفاده از ابرخازن موجب تأمین چگالی توان اضافی لازم موتورسیکلت الکتریکی شده است.

افزودن مکانیزم شتاب-سریع (با کلید تایمردار) به همراه ظرفیت مناسب منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند به طراحی سیستمی نظیر توربوشارژرها در خودروهای احتراقی منجر شود. مطالعات نشان می‌دهد به کارگیری مکانیزم شتاب-سریع می‌تواند در افزایش توان خودرو در هنگام پیمایش شیب، افزایش شتاب خودرو و افزایش سرعت لحظه‌ای آن تأثیرگذار باشد. سیستم توربوشارژر در وسایل نقلیه احتراقی، باعث افزایش توان موتورهای احتراقی حدود 15 تا 20 درصد می‌شود [13].

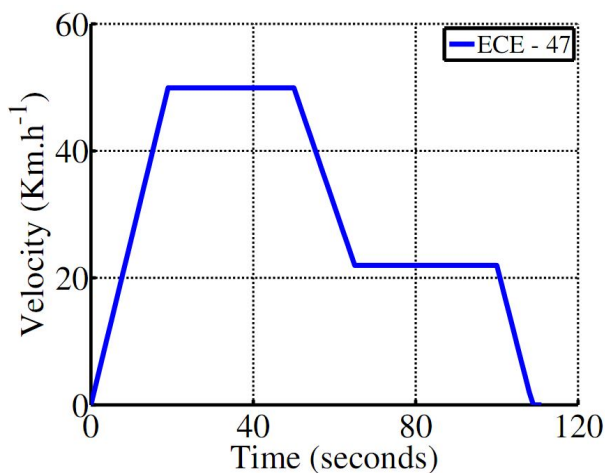
طراحی مکانیزم شتاب-سریع در موتورسیکلت الکتریکی بر مبنای افزایش 20 درصدی شتاب وسیله نقلیه انجام گرفته است؛ بنابراین، مکانیزم شتاب-سریع می‌تواند بیشتر از سیستم توربوشارژر در خودروهای احتراقی تأثیرگذار باشد. در مقاله حاضر، برای نخستین بار، امکان استفاده از باتری زبرا در موتورسیکلت الکتریکی، به همراه ابرخازن و افزودن مکانیزم شتاب-سریع بررسی شده است. عملکرد باتری زبرا از نظر افزایش بازده انرژی، کاهش هزینه، طول عمر، عدم نیاز به تمهیدات

شده است [16].

بیشترین مدت زمان شتاب گیری در سیکل های رانندگی مذکور مربوط به 18 ثانیه اول در سیکل رانندگی شهری ECE-47 است که دارای شتاب  $0.74 \text{ m.s}^{-2}$  می باشد. در موتورسیکلت الکتریکی پیشنهادی از یک کلید شتاب-سریع نصب شده بر روی فرمان موتورسیکلت برای فعال کردن مکانیزم شتاب-سریع توسط راننده استفاده شده است. کلید شتاب-سریع از نوع کلیدهای مدت دار است که دستور فعال شدن مکانیزم شتاب-سریع و وارد شدن ابرخازن به مدار را صادر می کند. حداکثر مدت زمان شتاب گیری در سیکل رانندگی شهری ECE-47 برابر 18 ثانیه است که در سیستم پیشنهادی مدت زمان 36 ثانیه (دو برابر مدت زمان واقعی شتاب گیری در سیکل رانندگی ECE-47) برای تداوم عملکرد شتاب-سریع درحین فعال کردن عملگر شتاب-سریع، به منظور تأمین شتاب در مواقع اضطراری و افزایش سرعت، در نظر گرفته شده است.



شکل (3): سیکل رانندگی استاندارد ECE-15

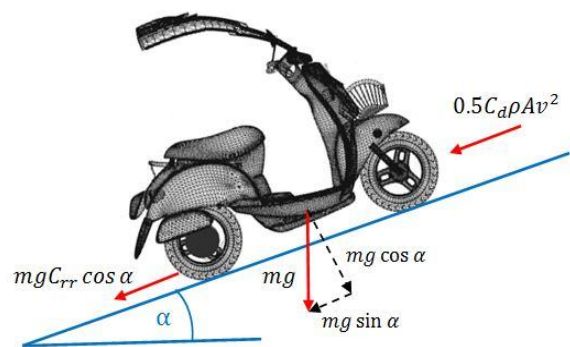


شکل (4): سیکل رانندگی استاندارد ECE-47

توان لازم چرخ موتورسیکلت برای حرکت و توان لازم باطری نیز از روابط زیر محاسبه می شوند که در آن،  $P_{auxiliary}$  توان لازم برای سایر قسمت های برقی موتورسیکلت از قبیل چراغ ها و نمایشگرها (حدود 60W) است. همچنین  $\eta_{drivetrain}$  بازده مجموعه الکتروموتور و سیستم انتقال قدرت (80%) است.

$$P_{wheels} = V(F_{aero} + F_{roll} + F_{grad}) + maV \quad (5)$$

$$P_{output} = \frac{P_{wheels}}{\eta_{drivetrain}} + P_{auxiliary} \quad (6)$$



شکل (2): شمای کلی نیروهای اعمال شده بر یک موتورسیکلت

### 3. مشخصات موتورسیکلت هدف

میزان پیموده شده توسط وسیله نقلیه در کشورهای مختلف متفاوت است؛ برای مثال در کشور مالزی، نصف وسایل نقلیه کمتر از 20km در روز و نصف دیگر بیشتر از 30km در روز استفاده می شوند [15]؛ درحالی که در کشور هند (شهر کمباتوره<sup>1</sup>)، 93% وسایل نقلیه کمتر از 50km و 7% بیش از 50km در روز استفاده می شوند [11]. در حال حاضر، وسایل نقلیه دوچرخ در هند بیش از 77% بازار خریدوفروش وسایل نقلیه را به خود اختصاص داده اند و پیش بینی می شود تا سال 2020 تعداد وسایل نقلیه دوچرخ در هند، از تعداد آن در چین نیز بیشتر گردد [14]؛ لذا موتورسیکلت طراحی شده باید قابلیت پیمایش مسافت 50km طی هربار شارژ باتری تحت سیکل های رانندگی استاندارد در وضعیت دو سرنشین را داشته باشد.

در این مقاله، برای تعیین مسافت قابل پیمایش، ظرفیت باتری، نوع باتری و توان الکتروموتور موتورسیکلت از سیکل رانندگی شهری استاندارد<sup>2</sup> ECE-15 و سیکل رانندگی ECE-47 همانند شکل های (3) و (4) که دو سیکل معتبر و پرکاربرد در بررسی عملکرد وسایل نقلیه و میزان انتشار گازهای آلاینده هستند، استفاده

1. Coimbatore  
2. ECE-15 or Urban Driving Cycle

1.3. الکتروموتور

الکتروموتور انتخاب شده یک AFIPM<sup>1</sup> از نوع 4 فاز است که توابع اهداف ما را به خوبی برآورده می‌سازد. این الکتروموتور به منظور دستیابی به نسبت گشتاور-وزن زیاد، بازده بیشتر، حداقل ریپل گشتاور و قابلیت استفاده بهینه در کوپل مستقیم (جاسازی در داخل تایر موتورسیکلت) طراحی شده است. با توجه به اینکه موتورهای الکتریکی بدون جاروبک ریپل گشتاور زیادی در مقایسه با موتورهای الکتریکی سنکرون دارند، ارائه راهکارهایی از قبیل افزایش تعداد فازهای تحریک، جهت کاهش ریپل گشتاور موتور الکتریکی بدون جاروبک مؤثر واقع شده است. چگالی خطی جریان در شعاع داخلی الکتروموتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود [17]:

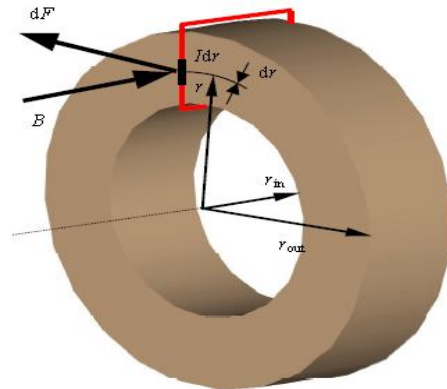
$$A_{in} = \frac{mN_{ph}I}{\pi r_{in}} \quad (7)$$

که در آن،  $m$  تعداد فازها،  $N_{ph}$  تعداد دورهای سیم پیچ هر استاتور،  $I$  جریان هر فاز و  $r_{in}$  شعاع داخلی روتور ماشین الکتریکی است. همچنین چگالی خطی جریان در هر شعاعی از ماشین از رابطه (8) به دست می‌آید.

$$A = \frac{A_{in}r_{in}}{r} \quad (8)$$

در نهایت، المان جزئی گشتاور تولیدی با توجه به شکل (5) و روابط بالا به صورت رابطه (9) محاسبه می‌شود که با انتگرال گیری از آن، گشتاور تولیدی موتور الکتریکی AFPM از طریق رابطه (10) به دست می‌آید. در روابط مذکور  $B_{max}$  چگالی شار بیشینه در فاصله هوایی است.

$k_D$  نسبت شعاع داخلی روتور ماشین به شعاع خارجی آن است و مقدار بهینه آن جهت دستیابی به گشتاور بیشینه برابر 0/58 است.



شکل (5): مکانیزم تولید گشتاور در AFPM [17]

$$dT_{em} = 2\pi r_{in} A_{in} B_{max} r dr \quad (9)$$

$$T_{em} = 2\pi A_{in} B_{max} r_{out}^3 k_D (1 - k_D^2) \quad (10)$$

الکتروموتور 4 فاز دارای گشتاور متوسط بیشتری است و همچنین ریپل گشتاور رلوکتانسی<sup>2</sup> آن (2/7%) بسیار کمتر از نوع 3 فاز آن (18%) می‌باشد. علاوه بر آن، الکتروموتور 4 فاز به دلیل داشتن نسبت گشتاور-جریان فاز و گشتاور-وزن بزرگ‌تر و بازده بیشتر نسبت به نوع 3 فاز آن برتر است. مشخصات موتور الکتریکی چهار فاز پیشنهادی به همراه مشخصات نوع سه فاز آن در جدول (1) ارائه شده است [18].

الکتروموتور مذکور با توان خروجی 3 کیلووات، دارای قابلیت کنترل با روش مدولاسیون پهنای باند<sup>3</sup> شده است و جریان استاتور را به خوبی کنترل می‌کند؛ لذا بازده زیادی دارد و به نوبه خود، سبب افزایش مسافت طی شده می‌شود. ریپل گشتاور در حالت سه فاز و چهار فاز به ترتیب، 3/8% و 2/7% است که حاکی از کاهش 18 درصدی ریپل گشتاور نسبت به حالت سه فاز در صورت استفاده از مدل چهار فاز است، اگرچه استفاده از سیستم چهار فاز مستلزم هزینه اضافی و پیچیدگی غیرضروری بخش الکتریکی است [18].

جدول (1): مشخصات موتورهای الکتریکی مطرح شده [18]

مشخصات AFBL	چهار فاز	سه فاز
جریان بیشینه	54/3 آمپر	72/4 آمپر
گشتاور نامی	59 نیوتن متر	52 نیوتن متر
گشتاور بیشینه	60/5 نیوتن متر	62/1 نیوتن متر
توان نامی	3 کیلووات	3 کیلووات
سرعت نامی	430 دور در دقیقه	430 دور در دقیقه
ولتاژ نامی	15/2 ولت	15/2 ولت
وزن موتور	10 کیلوگرم	10/5 کیلوگرم

2.3. باتری

جدول (2) مشخصات برجسته‌ترین باتری‌های شارژشدنی موجود در بازار را نشان می‌دهد [11 و 19]. در وسایل نقلیه الکتریکی با توجه به محدودیت انرژی باتری و چگالی انرژی ضعیف باتری‌ها در مقایسه با

2. Reluctance Torque  
3. PWM

1. Axial Flux Interior Permanent Magnet

جدول (2): شاخص باتری‌های برجسته موجود در بازار [19 و 11]

باتری	انرژی ویژه (Wh.kg <sup>-1</sup> )	توان ویژه (W.kg <sup>-1</sup> )	طول عمر (سیکل)	بازده انرژی
سرب-اسید	35-50	150-400	500-1000	80%
نیکل-متال هیدرید	70-95	200-300	800-2000	70%
سدیم-نیکل کلراید	90-120	130-168	1200	80%
لیتیوم-یون	80-130	200-300	1000	95%

سوخت‌های فسیلی، انتخاب باتری با انرژی ویژه زیاد و وزن کم، از اولویت‌های اساسی خودروی الکتریکی است [12]. باتری‌های لیتیوم-یون، نیکل-متال هیدرید و سدیم-نیکل کلراید<sup>1</sup> از انرژی ویژه زیادی برخوردار هستند؛ لذا گزینه مناسبی جهت کاربرد در موتورسیکلت الکتریکی می‌باشند.

با توجه به بهبود مشخصات باتری‌های سدیم-نیکل کلراید (با نام تجاری زبرا) از قبیل ایمنی و امنیت حرارتی زیاد و قیمت ارزان، امکان استفاده از این باتری‌ها در وسایل نقلیه الکتریکی فراهم شده است [12]. هزینه متوسط تولید انبوه هر یک از باتری‌های سرب-اسید، نیکل-متال هیدرید، لیتیوم-یون و سدیم-نیکل کلراید برحسب دلار بر کیلووات ساعت، به ترتیب برابر 135، 175، 165 و 109 هستند که نشان‌دهنده قیمت ارزان‌تر سدیم-نیکل کلراید در مقایسه با سه باتری دیگر است [19 و 11].

### 3.3. ابرخازن

در سیستم مدیریت انرژی، وظیفه تأمین جریان عمده تغذیه الکتروموتور در زمان حرکت موتورسیکلت بر عهده باتری است؛ اما در عین حال، می‌توان از منابع کمکی نیز برای بهبود مدیریت انرژی استفاده کرد. ابرخازن‌های جدید دارای چگالی انرژی زیاد، قابلیت شارژ و دشارژ سریع، عمر طولانی و بازده فراوان هستند؛ هرچند انرژی ویژه آن‌ها در مقایسه با باتری‌ها کمتر است (شکل 6)، در مواقع شتاب‌گیری و راه‌اندازی به باتری کمک می‌کنند [20]. همچنین در هنگام ترمز مولدی، انرژی بازیافتی را ذخیره می‌کنند.

تعیین ظرفیت ابرخازن به‌منظور قابلیت دریافت انرژی ترمز مولدی و همچنین تأمین توان اضافی لازم موتورسیکلت به‌هنگام عملکرد کلید شتاب-سریع، به عوامل مختلفی از قبیل وزن موتورسیکلت، شتاب و سرعت آن، بازده تجهیزات الکترونیک قدرت، شیب جاده و... بستگی دارد. معمولاً تخلیه الکتریکی ابرخازن‌ها تا 50% ولتاژ نامی به‌راحتی امکان‌پذیر است [21]. حداکثر انرژی خروجی حاصل از تخلیه الکتریکی ابرخازن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C (V_i^2 - V_f^2) \quad (11)$$

که در آن،  $V_i$  ولتاژ اولیه خازن قبل از تخلیه و  $V_f$  ولتاژ نهایی خازن است. ابرخازن‌ها برخلاف باتری‌ها دارای بازده شارژ و دشارژ یکسان هستند. تحت شرایط عادی معمولاً بازده آن‌ها در حدود 98% است؛ اما تحت جریان بسیار شدید ممکن است بازده آن‌ها در حدود 90% باشد.

یک ابرخازن معمولاً همانند شکل (7) مدل‌سازی می‌شود که در آن،  $ESR$  مقاومت معادل سری شده با ابرخازن و  $EPR$  مقاومت معادل موازی با ابرخازن است. در بیشتر کاربردهای عملی، معمولاً از  $EPR$  صرف‌نظر می‌شود؛ لذا مقدار مقاومت  $ESR$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن،  $\Delta V$  و  $\Delta I$  به ترتیب تغییرات ولتاژ و جریان در حین شارژ می‌باشند [22].

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (12)$$

همچنین مقادیر بیشینه توان و انرژی برای یک ابرخازن از روابط زیر محاسبه می‌شوند [23] که در آن،  $mass$  وزن ابرخازن است.

$$P_{Max} = \frac{V^2}{4 \times ESR \times mass} \quad (13)$$

$$E_{Max} = \frac{\frac{1}{2} C V^2}{3600 \times mass} \quad (14)$$

ابرخازن‌ها به‌همراه یک مبدل دوطرفه همانند شکل (8) برای ذخیره انرژی مولدی استفاده می‌شوند؛ به‌طوری‌که در هنگام ترمز مولدی به‌جای فعل و انفعالات شیمیایی شدید در باتری‌ها، ابرخازن توانایی تحمل شارژ الکتریکی حاصل از ترمز مولدی را که به‌صورت ضربه‌ای و با چگالی توان زیاد اعمال می‌شود، خواهد داشت [24].

بیشینه جریان لحظه‌ای با تداوم زمانی یک ثانیه در ابرخازن‌ها از رابطه (15) محاسبه می‌شود و در نهایت، در جدول (3) مشخصات ابرخازن‌های مناسب برای کاربرد در موتورسیکلت الکتریکی ارائه شده است.

$$Maximum\ Peak\ Current = \frac{\frac{1}{2} C V}{C \times ESR + 1} \quad (15)$$

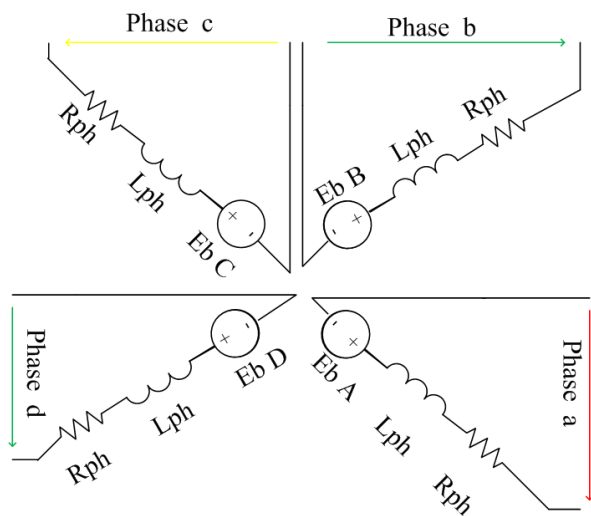
برای ذخیره‌سازی انرژی ترمز مولدی، علاوه بر درایو به بانک ابرخازنی مناسبی نیاز است که بتواند انرژی با جریان زیاد را ذخیره کند؛ زیرا باتری‌های موجود در وسایل نقلیه الکتریکی نمی‌توانند انرژی با چگالی زیاد را بگیرند. تزریق جریان انرژی ترمز مولدی به ابرخازن از طریق یک سوئیچ الکترونیک قدرت که در مسیر درایو و بانک ابرخازنی قرار دارد، انجام می‌شود که کنترل آن نیز به وسیله PWM امکان‌پذیر است. با تحریک پدال ترمز یا کاهش تحریک پدال گاز توسط راننده، دستور فعال‌شدن و هدایت سوئیچ توسط PWM صادر می‌شود و بانک ابرخازنی شارژ می‌گردد.

سیم‌پیچی الکتروموتور چهار فاز همانند شکل (9) به صورت اتصال X است و به دلیل وجود نداشتن نقطه ختشی در سیم‌پیچی مذکور، بایستی کنترل ولتاژ هر یک از فازها به صورت جداگانه صورت پذیرد. این امر می‌تواند منجر به افزایش ولتاژ EMF و افزایش سرعت خروجی الکتروموتور شود [27].

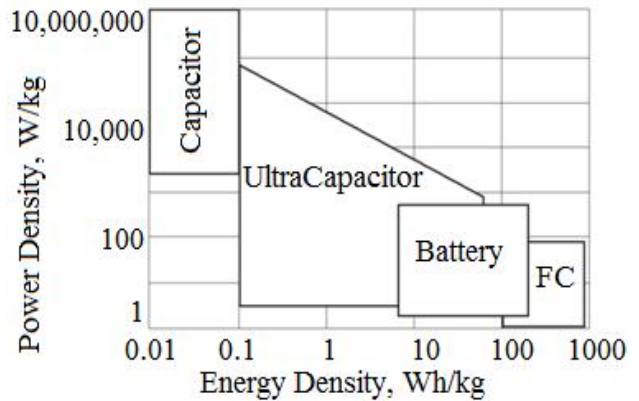
جدول (3): شاخص ابرخازن‌های مناسب جهت موتورسیکلت الکتریکی

[25 و 23]

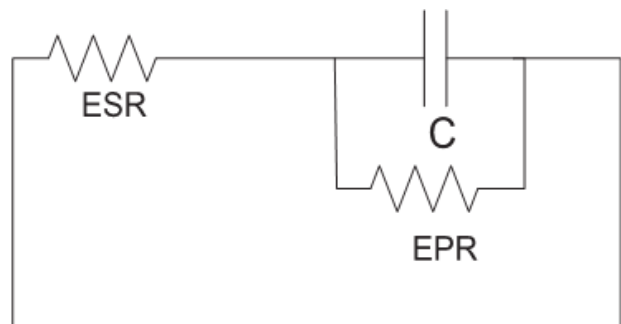
نام محصول	ظرفیت (F)	ولتاژ (V)	جریان (A)	وزن (g)	چگالی انرژی (Wh.kg <sup>-1</sup> )	چگالی توان (kw.kg <sup>-1</sup> )
BCAP0650 P270 K05	650	2/7	88	160	4/1	14
BCAP1200 P270 K05	1200	2/7	110	260	4/7	12
BCAP1500 P270 K05	1500	2/7	140	280	5/4	14
HEP1700-00027A	1700	2/7	360	380	4/5	6/85
BCAP2000 P270 K05	2000	2/7	170	360	5/6	14
BCAP300 P270 K05	3000	2/7	210	510	6/0	12



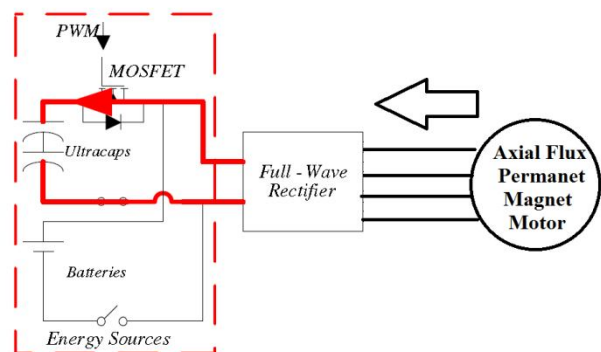
شکل (9): الکتروموتور AFPM به صورت اتصال چهار فاز X



شکل (6): منحنی توان ویژه و چگالی انرژی منابع ذخیره‌ساز انرژی



شکل (7): مدار معادل ابرخازن [22]



شکل (8): کاربرد مبدل دوطرفه به همراه ابرخازن برای بازیافت انرژی

### 4.3. مبدل چهار فاز دوطرفه

برای کنترل و راه‌اندازی الکتروموتور چهار فاز AFPM، از یک محرک چهار فاز تمام موج دوطرفه استفاده شده است که قابلیت تعویض جهت جریان و تضمین مسیر برگشت انرژی ترمز مولدی از الکتروموتور به ابرخازن را دارد. محرکه پیشنهادی از 16 سوئیچ الکترونیک قدرت (MOSFET یا IGBT) تشکیل شده که در هر فاز آن، از چهار عدد سوئیچ قدرت برای ساختن مبدل پل H دوطرفه استفاده شده است و کلیدزنی آن‌ها از طریق مدولاسیون پهنای باند صورت می‌گیرد [26].

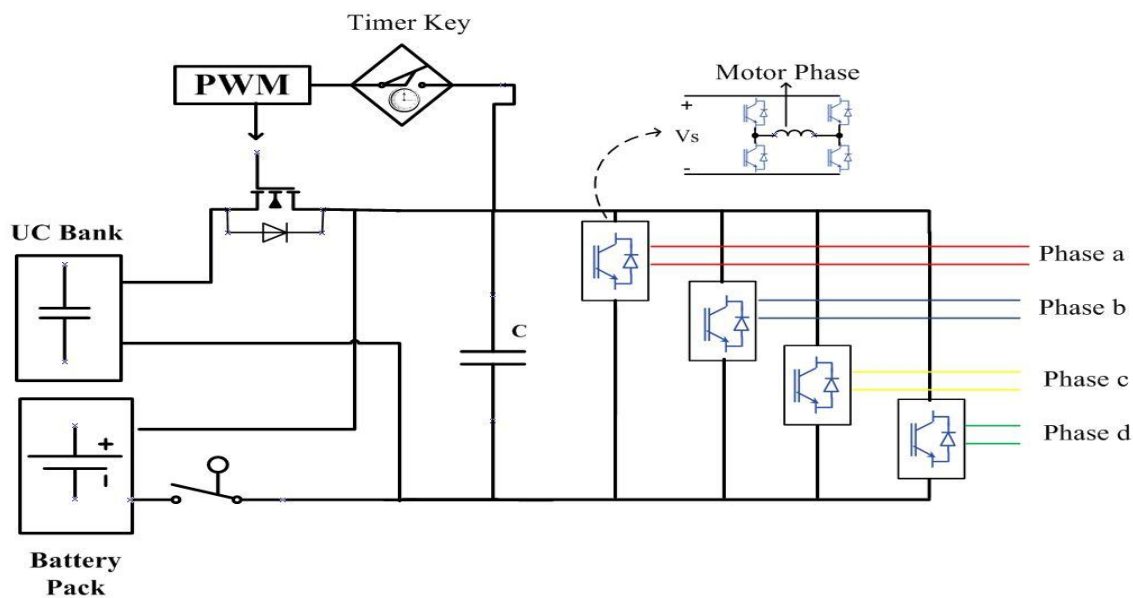
آهن‌ریای دایم است.

$$E_b I_{ph} = T_q \omega \quad (17)$$

$$\omega_e = (N_r \omega / 2) \quad (18)$$

با توجه به روابط فوق، بیشینه سرعت خروجی الکتروموتور برحسب جریان و ولتاژ درایو چهار فاز دوطرفه از طریق روابط (19-22) به دست می‌آید [27].

همچنین با توجه به مطالب ذکر شده، در شکل (10)، شماتیک کلی سیستم منبع انرژی و مبدل آن در موتورسیکلت الکتریکی پیشنهادی شامل درایو چهارفاز دوطرفه، باتری، بانک خازنی و کلید فعال‌کننده مکانیزم شتاب-سریع نشان داده شده است.



شکل (10): دیاگرام کلی سیستم منبع انرژی و مبدل آن به همراه مکانیزم شتاب-سریع

همچنین بیشینه  $DOD^2$  هریک از باتری‌ها نیز 80% در نظر گرفته شده است. شکل‌های (11) و (12) توان لازم موتورسیکلت برای پیمایش سیکل‌های رانندگی ECE-15 و ECE-47 را در حالت تک‌سرنشینه و دوسرنشینه نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی لازم باتری‌های مختلف برحسب مسافت طی شده در شکل‌های (13) و (14) ارائه شده است. همان‌طور که از شکل‌ها نیز پیداست، سیکل رانندگی شهری استاندارد ECE-15 به انرژی بیشتری نیاز دارد؛ لذا جهت جلب رضایت کاربران موتورسیکلت از ECE-15 به عنوان سیکل مرجع در تعیین مسافت پیموده شده و سایر پارامترهای منابع انرژی استفاده شده است. همچنین

سرعت مکانیکی الکتروموتور تابعی از ولتاژ EMF القا شده در هر فاز و جریان آن است که توسط مبدل چهارفاز دوطرفه تأمین می‌شود. ولتاژ فاز درایو همانند رابطه (16) سبب القای ولتاژ EMF در الکتروموتور می‌شود که در آن،  $E_b$ ،  $I_{ph}$ ،  $R_{ph}$ ،  $L_{ph}$  به ترتیب اندوکتانس، مقاومت، جریان و ولتاژ EMF هریک از فازهای الکتروموتور AFPM چهار فاز است [27].

$$L_{ph} \frac{dI_{ph}}{dt} + R_{ph} I_{ph} + E_b = E_{ph} \quad (16)$$

توان خروجی الکتروموتور و فرکانس مبدل چهار فاز نیز با صرف نظر کردن از تلفات مبدل از روابط (18) و (17) محاسبه می‌شوند که در آن،  $T_q$  گشتاور متوسط الکتروموتور و  $\omega$  سرعت خروجی و  $N_r$  تعداد

$$\omega = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (19)$$

$$a = \frac{1}{4} (N_r I_{ph} L_{ph})^2 + \left( \frac{T_q}{N_{ph} I_{ph}} \right)^2 \quad (20)$$

$$b = \frac{2}{N_{ph}} T_q R_{ph} \quad (21)$$

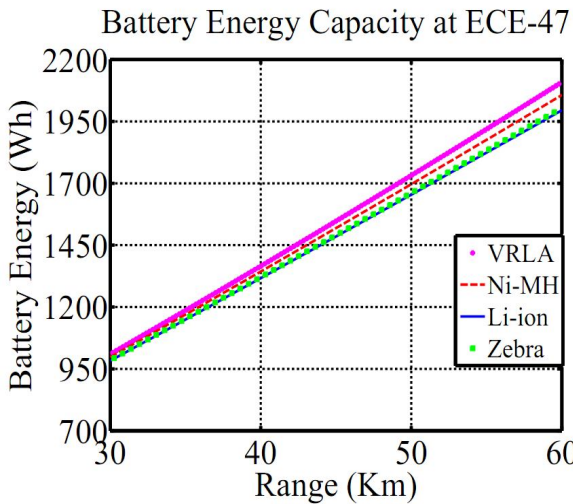
$$c = I_{ph}^2 R_{ph}^2 - E_{ph}^2 \quad (22)$$

#### 4. شبیه‌سازی و نتایج

برای شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب، وزن خالص موتورسیکلت الکتریکی بدون باتری 80kg فرض شده است که برابر با وزن خالص بدون باتری موتورسیکلت الکتریکی "FORTUNE 200e" می‌باشد و وزن هریک از سرنشینان نیز 60 kg تخمین زده شده است [9].



وزن لازم باتری‌های مختلف برحسب مسافت طی شده در شکل‌های (15) و (16) ارائه شده است.

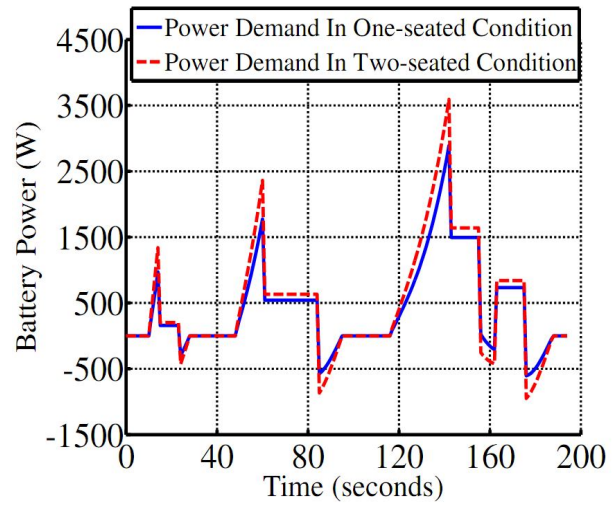


شکل (14): انرژی باتری‌ها برحسب مسافت طی شده در سیکل ECE-47

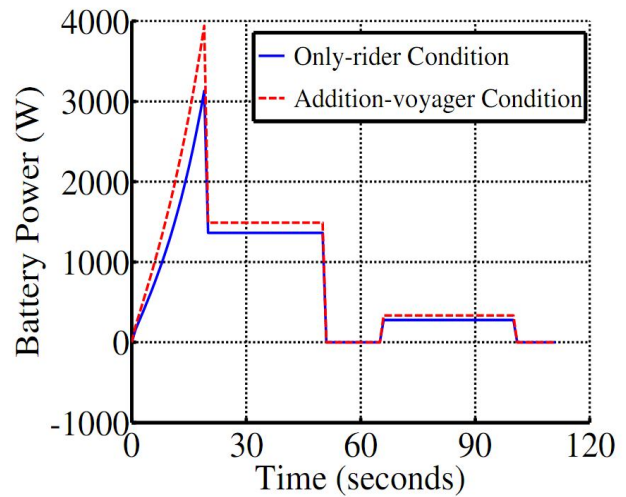
براساس نتایج شبیه‌سازی، میزان انرژی لازم باتری‌ها بدون کمک ابرخازن در ازای پیمایش مسافت‌های 42 و 50 کیلومتر طی یک بار شارژ در جدول (4) ارائه شده است.

جدول (4): میزان انرژی (وات ساعت) لازم باتری‌ها بدون کمک ابرخازن در ازای پیمایش مسافت‌های 42 و 50 کیلومتر

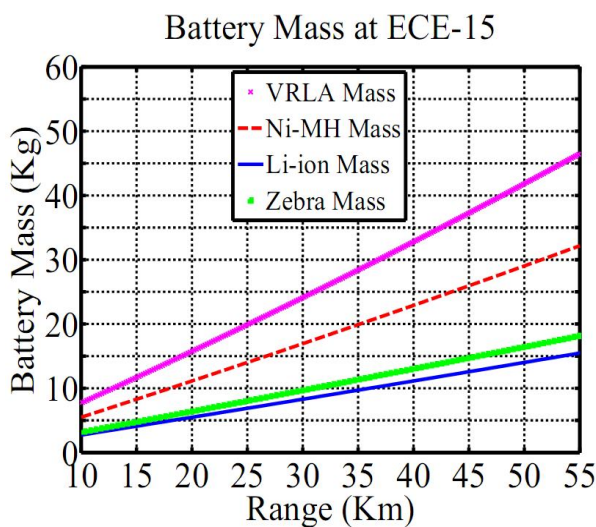
نوع باتری	سرب-اسید	نیکل-متال هیدرید	سدیم-نیکل کلراید	لیتیوم-یون
انرژی لازم برای پیمایش 42 کیلومتر	1758	1728	1688	1684
انرژی لازم برای پیمایش 50 کیلومتر	2102	2045	1988	1983



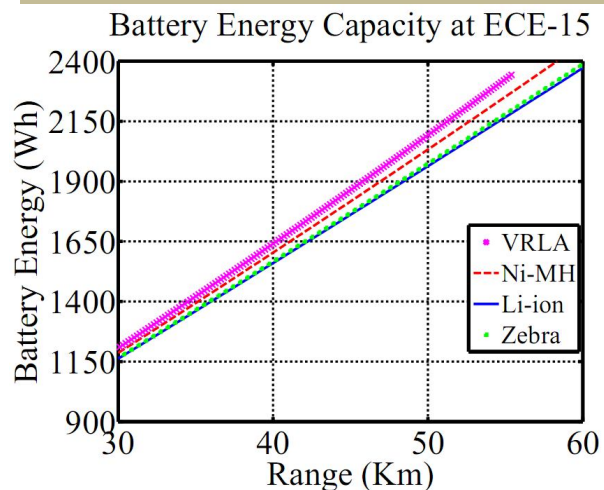
شکل (11): توان لازم موتورسیکلت برای پیمایش سیکل ECE-15



شکل (12): توان مورد نیاز موتورسیکلت برای پیمایش سیکل ECE-47

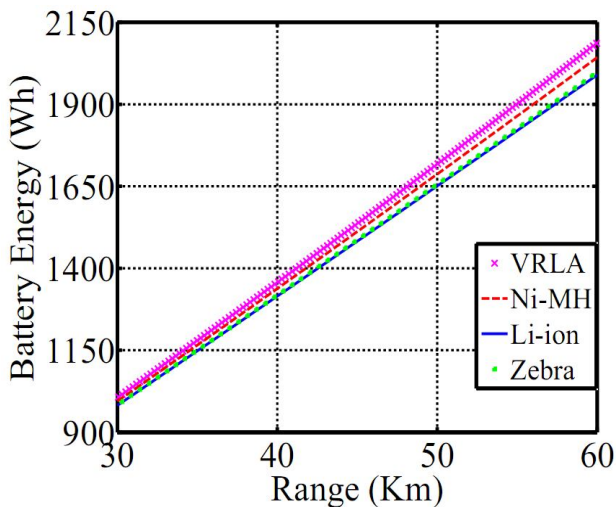


شکل (15): وزن برحسب مسافت طی شده در سیکل ECE-15



شکل (13): انرژی باتری‌ها برحسب مسافت طی شده در سیکل ECE-15

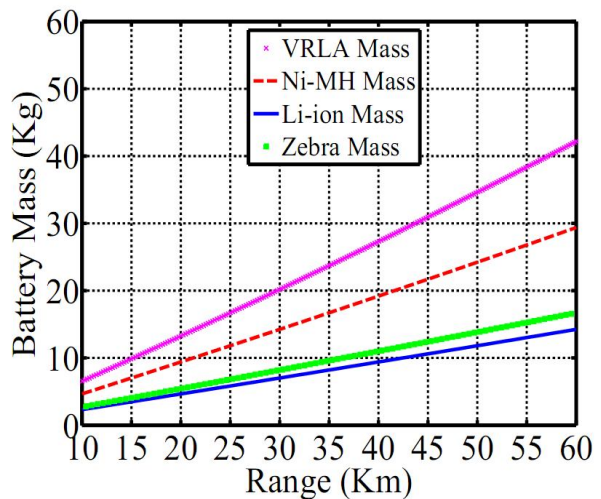
چون مدت زمان دوام آن بسیار کم است، موجب وارد آمدن آسیب جدی به الکتروموتور نخواهد شد.



شکل (17): انرژی لازم باتری‌ها برحسب مسافت طی شده تحت شرایط استفاده از ابرخازن

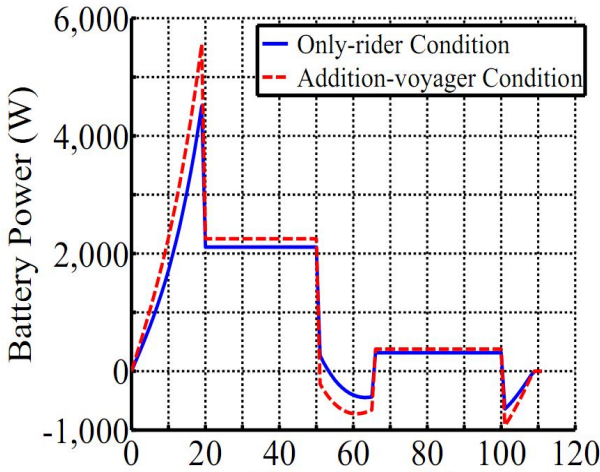
با توجه به منحنی حاصل از شکل (20)، در صورتی که ابرخازن انرژی لازم الکتروموتور را در حالت عملکردی شتاب-سریع تأمین کند و الکتروموتور به نحوی کنترل شود که 18 ثانیه اول را با شتاب ماکزیمم  $(1/2 * 0/74)$  و 18 ثانیه دوم را با توان خروجی ثابت بپیماید، توان خروجی الکتروموتور و سرعت موتورسیکلت الکتریکی هنگام عملکرد شتاب-سریع همانند شکل‌های (21) و (22) خواهد بود.

با توجه به نتایج حاصل از عملکرد مکانیزم شتاب-سریع، توان بیشینه لازم الکتروموتور 5200 وات است و برای تأمین توان بیشینه مذکور توسط منابع ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن تلفات، نیاز به یک منبع با قابلیت تأمین توان بیشینه 5780 وات همانند شکل (20) است. توان متوسط الکتروموتور مذکور در طول مدت زمان شتاب-سریع در حدود 3591 وات است که برای یک الکتروموتور با توان نامی 3 کیلووات تحمل‌پذیر است، همچنین کل انرژی تأمین‌شده توسط منابع ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن تلفات در حدود 144/64 کیلوژول است که بایستی توسط باتری و ابرخازن تأمین شود.

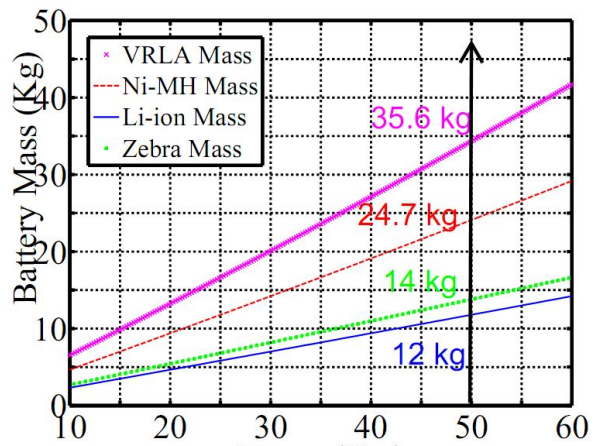


شکل (16): وزن برحسب مسافت طی شده در سیکل ECE-47

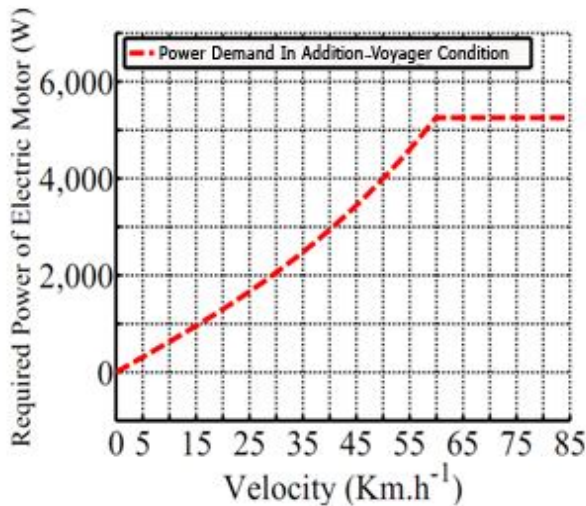
شکل (17) انرژی لازم باتری‌ها برحسب مسافت طی شده را تحت شرایط استفاده از ابرخازن و بازیافت انرژی مولد ترمزی نشان می‌دهد. همچنان‌که می‌بینید، اگر برای تأمین توان لازم حرکت موتورسیکلت، از باتری سدیم-نیکل کلراید با ظرفیت 1688 وات ساعت (48 ولت-35 آمپرساعت) و ابرخازن کمکی استفاده کنیم، مسافت طی شده با دو سرنشین برابر 50 کیلومتر خواهد شد که مطابق جدول (4)، در صورت عدم استفاده از ابرخازن مسافت طی شده موتورسیکلت الکتریکی با این میزان انرژی باتری، توانایی پیمایش مسافت 42 کیلومتر را دارد. همچنین مطابق شکل (18)، وزن باتری لازم در صورت استفاده از باتری سدیم-نیکل کلراید 14 کیلوگرم خواهد بود. همان‌طور که گفتیم، بیشترین شتاب در سیکل‌های رانندگی مربوط به سیکل رانندگی ECE-47 است؛ لذا اگر موتورسیکلت الکتریکی پیشنهادی سیکل مذکور را در حالت شتاب-سریع فقط به مدت 18 ثانیه در حالت شروع به حرکت طی کند، سرعت خروجی موتورسیکلت و توان لازم الکتروموتور همانند شکل‌های (19) و (20) خواهد شد نظر به اینکه الکتروموتورهای AFPM قابلیت تحمل توانی در حدود 2 برابر توان نامی را به مدت 120 ثانیه دارند [22-25]؛ لذا با توجه به نتایج شکل (20) که در آن، توان خروجی الکتروموتور در حالت افزایش شتاب 18 ثانیه‌ای در بحرانی‌ترین حالت به 5200 وات می‌رسد نظر بر اینکه توان نامی الکتروموتور 3000 وات است؛ اما



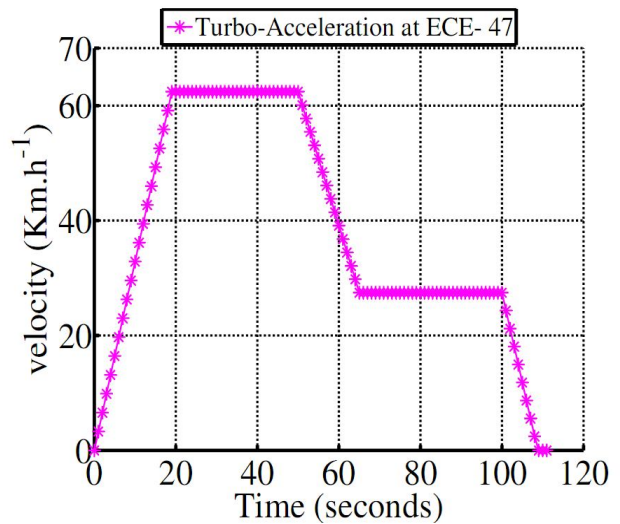
شکل (20): توان الکتروموتور در شتاب‌گیری با 20 درصد شتاب اضافی تحت سیکل ECE-47



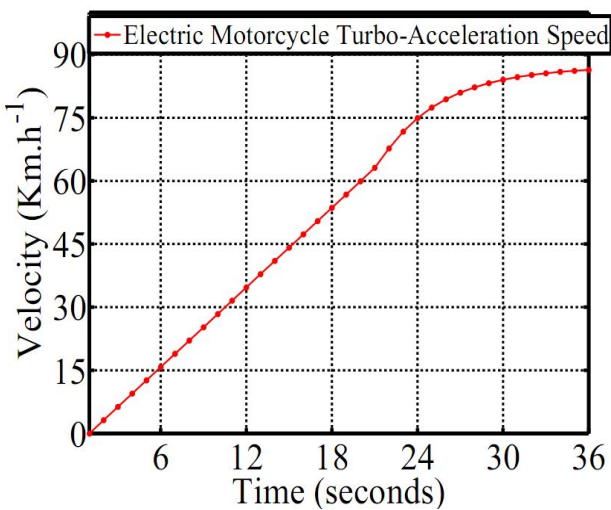
شکل (18): وزن باتری‌ها برحسب مسافت طی شده تحت شرایط استفاده از ابرخازن



شکل (21): توان الکتروموتور هنگام شتاب-سریع



شکل (19): سرعت موتورسیکلت در شتاب‌گیری با 20 درصد شتاب اضافی تحت سیکل ECE-47



شکل (22): سرعت موتورسیکلت الکتریکی در عملکرد شتاب-سریع

بیشینه توان باتری زبرای پیشنهادشده در حدود 2240 وات است. مابقی توان لازم باید از طریق ابرخازن تأمین شود. بانک ابرخازنی مذکور همچنین باید قابلیت تأمین مابقی انرژی لازم شتاب سریع را داشته باشد. با بررسی ابرخازن‌های موجود در جدول (3)، می‌توان نتیجه گرفت 18 عدد ابرخازن سری شده از نوع BCAP1500 P270 K05 با ظرفیت 83/3 فاراد و ولتاژ 48/6 ولت می‌تواند پاسخگوی نیاز شتاب-سریع سیستم باشد.

## 5. نتیجه گیری

پیمایش مسافت طولانی تر با یک بار شارژ، چگالی انرژی زیاد، وزن کم و حجم کوچک باتری، از جمله پارامترهای اساسی در انتخاب نوع و ظرفیت باتری در موتورسیکلت الکتریکی هستند. نتایج حاصل از شبیه سازی مشخص کرد که ظرفیت باتری ها تابعی خطی از مسافت قابل پیمایش هستند که شیب آن ها نسبت مستقیم با انرژی ویژه باتری دارد. همچنین دیده شد باتری سدیم-نیکل کلراید دارای هزینه اولیه کمتری است. در نهایت، نتایج حاصل با در نظر گرفتن طول عمر باتری ها که اهمیت ویژه ای در میزان هزینه سالیانه دارد، حکایت از کاهش هزینه سالیانه و افزایش رضایت مشتریان در صورت استفاده از باتری سدیم-نیکل کلراید دارد.

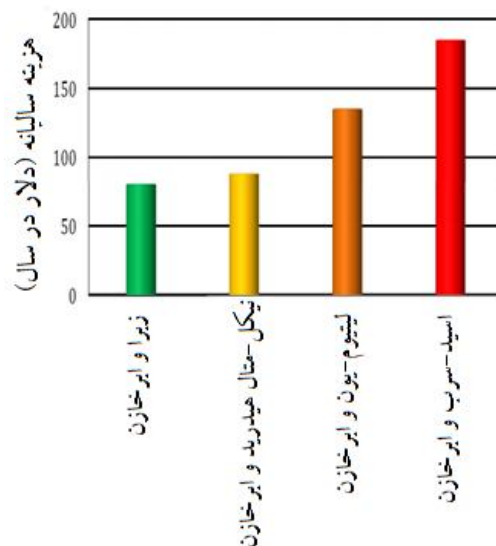
باتری زبرای انتخاب شده قابلیت تأمین حدود 50% انرژی لازم را در راستای عملکرد مکانیزم شتاب-سریع دارد که مابقی انرژی توسط ابرخازن پیشنهادی تأمین می شود. طبق کاتالوگ شرکت سازنده، مقدار بیشینه انرژی ذخیره ای ابرخازن مذکور 98/38 کیلوژول می باشد که به دلیل محدودیت های الکترونیک قدرت 75% انرژی آن به دست آمده است. با وجود این، پاسخ گوی مابقی انرژی لازم است. گفتنی است در هریک از سیکل های رانندگی شهری ECE-15 و ECE-47 در حالت های دوسرنشینه و تک سرنشینه، انرژی حاصل از بازیافت انرژی ترمز مولدی در ابرخازن ذخیره می شود که ابرخازن پیشنهادی علاوه بر اینکه قابلیت تأمین عملکرد مکانیزم شتاب-سریع را دارد، از ظرفیت کافی برای ذخیره انرژی ترمز مولدی نیز برخوردار است.

در کار حاضر، با استفاده از بازیافت انرژی حاصل از ترمز مولدی در سیکل های رانندگی استاندارد ECE-47 و ECE-15، و انتقال آن به ابرخازن ها، افزایش حدود 20 درصدی در مسافت پیموده شده نسبت به حالت استفاده از باتری حاصل شد. بدیهی است که ابرخازن ها همچنین نقش انکارناپذیری در عملکرد مکانیزم شتاب-سریع دارند و با تأمین جریان اضافی لازم برای راه اندازی و شتاب گیری، علاوه بر افزایش طول دشارژ باتری، منجر به افزایش طول عمر آن و بهینه سازی مصرف باتری ها می شوند.

بر اساس نتایج حاصل از انرژی لازم باتری ها، هزینه اولیه باتری سدیم-نیکل کلراید برای پیمایش مسافت 50 کیلومتر برابر 183 دلار است که در مقایسه با باتری لیتیوم-یون (302 دلار) و باتری نیکل-متال (346 دلار)، بسیار ارزان تر است. هزینه باتری سدیم-نیکل کلراید در حدود 60% باتری لیتیوم-یون و 53% باتری نیکل-متال هیدرید است. باتری های مذکور دارای طول عمر بسیار محدودتری نسبت به ابرخازن ها هستند؛ لذا نسبت هزینه سالیانه ابرخازن ها بسیار کمتر از باتری ها است. گفتنی است هزینه اولیه هر عدد ابرخازن انتخاب شده نیز در حدود 43 دلار است [28].

در شکل (23)، هزینه سالیانه باتری ها به همراه ابرخازن، مبتنی بر قیمت اولیه و طول عمر، برحسب دلار برای هر چهار نوع منبع ذخیره ساز انرژی محاسبه شده که باز هم نشان دهنده هزینه ارزان تر سالیانه مجموعه باتری سدیم-نیکل کلراید و ابرخازن (80 دلار در سال) نسبت به سایر منابع است.

همچنین برای پیمایش مسافت 50 کیلومتر به کمک ابرخازن، باتری سدیم-نیکل کلراید 14 کیلوگرم وزن دارد که بسیار سبک تر از باتری نیکل-متال هیدرید (24/7 کیلوگرم) و باتری سرب-اسید (35/6 کیلوگرم) است. هرچند باتری لیتیوم-یون 2 کیلوگرم سبک تر از باتری سدیم-نیکل کلراید است؛ اما هزینه اولیه و سالیانه آن بسیار زیادتر است.



شکل (23): هزینه سالیانه باتری ها برای طی مسافت 50 کیلومتر به کمک ابرخازن

- [1] *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion*, 2012 ed. Chap. 1, pp.9, Available on: <http://www.iea.org>.
- [2] Mierlo JV., Maggeto G., Lataire P., "Which Energy Source for Road Transport in the Future? A Comparison of Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicles", *Energy Convers Manage*, Vol. 47, No. 17, pp. 2748–60, 2006.
- [3] Weinert X.J., Burke F.A., Wei Xuezhe., "Lead-acid and Lithium-ion Batteries for the Chinese Electric Bike Market and Implications on Future Technology Advancement", *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 938–945, 2007.
- [4] Colella WG., "Market prospects, Design Features, and Performance of a Fuel Cell-powered Scooter", *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 255–260, 2000.
- [5] Anami B.S., Pagi B.V., Magi M.S., "Wavelet-based Acoustic Analysis for Determining Health Condition of Motorized Two-wheelers", *Applied Acoustics*, Vol. 72, pp. 464–469, 2011.
- [6] Caricchi F., Crescimbeni F., Honorati O., Napoli Di. A., Santini E., "Compact Wheel Direct Drive for EVs", *IEEE Industry Application Magazine*, pp.25–32, November/December 1996.
- [7] Chyuan-Yow Tseng, Chiu-Feng Lin., "Estimation of the State-of-charge of Lead-acid Batteries Used in Electric scooters", *Journal of Power Sources*, Vol. 145, pp. 282–287, 2005.
- [8] Wong Y.S., Chau K.T., Chan C.C., "Battery Sizing for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 2, No. 4, pp. 899–904, 2006.
- [9] Chou Jyh-Rong., Hsiao Shih-Wen., "Product Design and Prototype Making for an Electric Scooter", *Materials and Design*, Vol. 26, pp. 439–449, 2005.
- [10] Amjad Shaik., Rudramoorthy R., Neelakrishnan S., Varman K.Sri Raja., Arjunan T.V., "Evaluation of Energy Requirements for All-electric Range of Plug-in Hybrid Electric Two-wheeler", *Journal of Energy*, Vol. 36, pp. 1623–1629, 2011.
- [11] Amjad Shaik., Rudramoorthy R., Neelakrishnan S., Varman K.Sri Raja., Arjunan T.V., "Impact of Real World Drive Pattern and all-electric Range on Battery Sizing and Cost of Plug-in Hybrid Electric Two-wheeler", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 3371–3377, 2011.
- [12] Juan Dixon., Ian Nakashima., Eduardo F. Arcos., Micah Ortuzar., "Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Batter", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 3, pp. 943–949, 2010.
- [13] Boretta AA, Watson HC., "Enhanced Combustion by jet Ignition in a Turbocharged Cryogenic Port Fuel Injected Hydrogen Engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No.5, pp. 251–257, 2009.
- [14] Lin Bruce., "Conceptual Design and Modeling of a Fuel Cell Scooter for Urban Asia", *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 202–2013, 2000.
- [15] Sopian K, Othman MY, Yatim B, Daud WRW., "Future Directions in Malaysian Environment Friendly Renewable Energy Technologies R&D", *ISESCO Science Technology Vision*, Vol. 5, No. 1, pp.30–6, 2005.
- [16] [http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece\\_eudc.php](http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php).
- [17] Paviainen Asko., "Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-speed Machines and Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines", Ph.D. Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2005.
- [18] Yee-Pien Yang, Down Su Chuang., "Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars", *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 43, No. 1, pp. 51–61, 2007.
- [19] Rastler D., "Technology Review and Assessment of Distributed Energy Resources", *Electric Power Research Institute*, pp.4–7, 2006. Available on <http://www.epri.com>
- [20] Soylu Seref., *Electric vehicles– the benefits and barriers*, In Tech publishing, pp. 100–107, 2011.
- [21] Lam L. T., Louey R., "Development of Ultra-battery for Hybrid-electric Vehicle Applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 158, No. 2, pp. 1140–1148, 2006.
- [22] Sharma Pawan., Bhatti T.S., "A Review on Electrochemical Double-layer Capacitors", *Energy Conversion and Management Journal*, Vol. 51, pp. 2901–2912, 2010.
- [23] Available on <http://www.maxwell.com/ultracapacitor>
- [24] Farhadi Gharibeh H., Sadeghi Yazdankhah A., "Efficiency Improvement of a Directly-Driven Electric Scooter with Energy Management and Battery Sizing", *The Third Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, Isfahan, Iran, April 10–11, 2013.
- [25] Han M. Byung., Bae B., "Unified Power Quality Conditioner with Super-Capacitor for Energy Storage" *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol. 18, pp. 327–343, 2008.
- [26] Yee-Pien Yang, Jui-Ping Wang, Shang-Wei Wu, Yih-Ping Luh., "Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles—Part II: Optimal

37 بهبود بازده انرژی و ارزیابی اقتصادی موتورسیکلت الکتریکی با حضور...

*Current Waveforms and Performance Test*", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, 2004.

- [27] Yee-Pien Yang, Yih-Ping Luh, Cheng-Huei Cheung, "*Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles—Part I: Multi objective*

*Optimal Design and Analysis*", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, 2004.

- [28] Available on, <http://in.mouser.com/ProductDetail/MaxwellTechnologies/BCAP1500-P270-K04>