

## مطالعه آزمایشگاهی و تدوین مدل تجربی افت ظرفیت باتری لیتیوم یون فضایی

محمد زارعی جلیانی<sup>۱</sup>، محمد سرشار<sup>۲\*</sup>، محسن بابایی<sup>۳</sup>، عبدالمجید قاسمی<sup>۴</sup>

| اطلاعات مقاله   | چکیده   |
|---|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۱  | یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی باتری‌های لیتیوم یونی، مقدار افت ظرفیت آن‌ها در طول مدت استفاده و پس از دوره‌های متناوب شارژ/دشارژ است. به گونه‌ای که زمان رسیدن ظرفیت باتری به ۷۰٪ ظرفیت اولیه را زمان زوال باتری می‌نامند. بنابراین، در اختیار داشتن مدلی ریاضی که ضمن سهولت کاربرد بتواند با دقتی مناسب، پدیده افت ظرفیت را پیش‌بینی کند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، داده‌های آزمایشگاهی برای کاهش ظرفیت طی ده سیکل ابتدایی در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای یک نمونه باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای سامسونگ اندازه‌گیری شده است. همچنین، مدلی مرکب از مفاهیم قانون توانی و قانون تابع ریشه دوم برای پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم-یون ارائه شده که تابعی از دما و تعداد سیکل است. پارامترهای مدل بر اساس روش مارکوارت-لونبرگ با کمینه‌سازی مربع خطای پیش‌بینی داده‌های تجربی به دست می‌آیند. مدل فوق با وجود استفاده از داده‌های ده سیکل ابتدایی دارای حداکثر ۱۵٪ خطای پیش‌بینی بیشینه سیکل شارژ و دشارژ در نقطه زوال است. |
| پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶   |   |
| <b>واژگان کلیدی:</b><br>افت ظرفیت،<br>طول عمر،<br>باتری لیتیوم یون،<br>مدل ریاضی. |   |

### ۱- مقدمه

هیبریدی و انواع وسایل ارتباطی پیشرفته را به بازار معرفی کنند. همچنین نوع فناوری مورد استفاده در متالوژی این نوع باتری‌ها سبب شده باتری‌های قابل انعطاف و انحنای پذیر به بازار معرفی شوند [۱-۲].

فضاپیمای مدار پایینی زمین (LEO)<sup>۵</sup> برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای سنجش از راه دور (از جمله پیش‌بینی وضع هوا، نقشه‌کشی<sup>۶</sup>، برنامه‌ریزی شهری، ارزیابی محیط‌زیست، کشاورزی، جنگل‌داری، مدیریت آب‌های زیرزمینی و...) به کار می‌روند. باتری‌های فضاپیمای LEO برای پشتیبانی در مدت زمان خورشیدگرفتگی مورد نیاز هستند. در مدار LEO باتری‌ها باید در یک روز متحمل ۱۵ سیکل شارژ و دشارژ شوند. به‌طور معمول دوره تناوب مدار یک فضاپیمای LEO

امروزه باتری‌ها را در طیف گسترده‌ای از کاربردهای مختلف از صنعت اسباب بازی تا صنعت ماهواره و صنعت دفاعی، به دلیل دانسیته انرژی بالا و ولتاژ عملیاتی دلخواه می‌توان یافت. البته این نوع باتری‌ها دارای ضعف‌هایی مانند افت ظرفیت و افسارگسیختگی حرارتی نیز هستند. با وجود این، پیشرفت تجهیزات ارتباطی و ارائه محصولات جدید، بسیار وابسته به عملکرد باتری است و بدون پیشرفت و توسعه در فناوری باتری، امکان ارائه محصولات پیشرفته ارتباطی و تکنولوژیکی میسر نمی‌شود. پیشرفت چشمگیر در فناوری باتری‌های لیتیوم-یون سبب شده تا صاحبان صنایع و رهبران فناوری بتوانند محصولات جدید مانند انواع ماهواره و فضاپیما، ایستگاه‌های فضایی، خودروهای برقی و

<sup>2</sup> Cartography

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.sarshar@isrc.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد مهندسی انرژی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

۲. دانشیار مهندسی شیمی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

۳. دکتری مهندسی مواد، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

۴. کارشناسی ارشد شیمی فیزیک، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

ریاضی برای پیش‌بینی، شامل طیف گسترده‌ای از مدل‌های ریاضی است که از مدل‌های تجربی تا مدل‌های پیچیده ریاضی مبتنی بر دینامیک مولکولی را شامل می‌شود. پیچیدگی مدل ریاضی پیش‌بینی، وابسته به کاربردی است که برای آن انتظار می‌رود. بسیاری از مهندسان ترجیح می‌دهند از مدل‌های ریاضی چابک و سهل در محاسبه بهره‌جویند و بتوانند به سرعت پارامترهای مهم و ارزشمند یک باتری را محاسبه کنند و در طراحی زیر سیستم‌ها مورد استفاده قرار دهند. بنابراین، مدل‌های تجربی و نیمه تجربی مبتنی بر یک یا چند اصل علمی، انتخاب خوبی برای آن‌هاست.

پیش‌بینی ظرفیت باقی‌مانده یک باتری، مبنایی برای بهینه‌سازی مؤثر باتری و روش‌های مدیریت آن است. دو مؤلفه دما و عمر سیکلی یک باتری ثانویه تأثیر بسزایی بر رفتار باتری دارد. با افزایش دما ظرفیت دشارژ کامل، تمایل به افزایش دارد، اما عمر سیکلی کلی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بدون آگاهی از دما و عمر سیکلی باتری، غیرممکن است که بتوان پیش‌بینی دقیقی از ظرفیت باقی‌مانده باتری داشت [۸].

شارژ و دشارژ مکرر باتری‌ها باعث زوال تدریجی ظرفیت آن‌ها می‌شود؛ بنابراین، هنگام طراحی سیستم‌های ذخیره انرژی، لازم است ظرفیت‌های اولیه با در نظر گرفتن زوال انتخاب گردد تا اطمینان حاصل شود که باتری‌ها در دوره عملیاتی خود، ظرفیت اسمی ذخیره را برآورده می‌سازند. برای دستیابی به این مهم، داشتن یک مدل ریاضی ساده که بتواند پیش‌بینی دقیقی از طول عمر<sup>۱</sup> باتری ارائه دهد، دارای اهمیت بسیاری است [۹]. پیش‌بینی دقیق از طول عمر، نیازمند درک صحیح از فرایندهای مؤثر در زوال ظرفیت و همچنین هنر مدل‌سازی ریاضی برای استفاده مناسب از پارامترهای عملکردی است.

روش‌هایی که برای پیش‌بینی طول عمر توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته، عبارت‌اند از:

- پیش‌بینی بر اساس قانون تابع ریشه دوم، نقش «زوال ناشی از سیکل شارژ/دشارژ» در طول عمر باتری را به‌وسیله درون‌یابی ظرفیت تخمین می‌زند و بر مبنای این فرض است که زوال در ظرفیت متناسب با ریشه دوم تعداد سیکل‌هاست.

شامل ۶۵ دقیقه روشنایی نور آفتاب و ۳۵ دقیقه کسوف است. باتری، طی روشنایی نور خورشید شارژ و در زمان خورشیدگرفتگی دشارژ می‌شود تا پاسخ‌گوی تقاضای توان فضاپیما باشد. حتی ممکن است باتری‌ها در زمان وجود روشنایی نور خورشید نیز دشارژ شوند تا ماکزیمم تقاضای توان را برآورده سازند. انتظار می‌رود باتری‌های LEO برای ۵ تا ۸ سال دوام داشته باشند. در نتیجه، فضاپیماهای LEO که نیازمند ۵۵۰۰ سیکل شارژ و دشارژ در سال هستند، به شدت تحت تأثیر عملکرد باتری هستند [۳].

ترکیب پیل سوختی و باتری با دو راهبرد مدیریت انرژی، به تفکیک مدل‌سازی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شده است. این راهبردها شامل کنترل منطق فازی و کنترل حالت عملکردی است. این دو راهبرد توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده و در محیط شبیه‌ساز خودروهای پیشرفته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی طی چند دوره رانندگی و آزمون‌های عملکردی، حکایت از برتری راهبردهای بهینه‌سازی شده نسبت به راهبردهای بهینه‌سازی نشده و حتی راهبردهای قبلی موجود در شبیه‌ساز است. نتایج این مطالعه تأثیر قابل توجهی در صرفه‌جویی سوخت، حفظ سطح قوای منبع تغذیه، بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش کارایی منابع توان دارد [۴].

عملکرد باتری‌ها بسیار تحت تأثیر شرایط عملیاتی مختلف و تعداد سیکل‌های شارژ/دشارژ است. همچنین از آنجایی که خرابی باتری‌ها منجر به عدم موفقیت فضاپیما خواهد شد، باتری‌ها باید از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار باشند و الزامات سخت‌گیرانه کنترل کیفیت را قبل از استفاده، بگذرانند. بدین‌وسیله ظرفیت باقی‌مانده کمتر از ۴۰٪ و ولتاژ نهایی دشارژ کمتر از  $2/5 V$  به‌منزله خرابی باتری است [۵].

پیش‌بینی ریاضی پدیده‌های هم‌زمان انتقال جرم و حرارت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده، روش‌های متعددی برای شبیه‌سازی مدل‌های هم‌زمان جرم و حرارت معرفی شده است [۶-۷]. باتری‌ها نیز جزء فرایندهای شیمیایی اند که شامل پدیده‌های هم‌زمان شیمیایی، فیزیکی و الکتریکی هستند. در سال‌های گذشته تحقیقات وسیعی برای پیش‌بینی رفتار باتری‌ها به‌ویژه باتری‌های لیتیوم یونی به‌دلیل کاربرد وسیع آن‌ها صورت گرفته است. مدل‌های

<sup>1</sup> Lifetime

گستره کاربرد، روش‌های سریع و کاربردی‌اند و برای مدل‌سازی ریاضی آن‌ها می‌توان از توابع چندجمله‌ای، مثلثاتی، توانی و لگاریتمی بهره برد [۱۴]. برای اینکه تأثیر هم‌زمان دما و تعداد سیکل در تعیین ظرفیت باقی‌مانده باتری در نظر گرفته شود، از مدل نیمه‌تجربی نمایش داده‌شده در معادله (۱) استفاده شده که دربرگیرنده جمله توانی برای لحاظ کردن دمای عملیاتی و تابع ریشه دوم برای لحاظ کردن تعداد سیکل است. در این معادله، درصد افت ظرفیت ( $C_{r,cyc}$ ) با استفاده از معادله (۲) در هر دمای معین به دست می‌آید.

$$C_{r,cyc} = Ae^{-BT} \sqrt{N_{Cyc}} \quad (1)$$

$$C_{r,cyc} = \frac{Cap_1 - Cap_{10}}{Cap_1} \times 100 \quad (2)$$

در معادله (۲) نیز  $Cap_{10}$  و  $Cap_1$  به ترتیب ظرفیت باتری در سیکل اول و دهم در هر دمای معین است. متغیرهای معادله (۱) شامل تعداد سیکل شارژ/دشارژ ( $N_{cyc}$ ) و دمای محیطی ( $T$ ) بوده، ثابت‌های  $A$  و  $B$  با استفاده از آزمون‌های ظرفیت برای ۱۰ سیکل شارژ/دشارژ در دماهای محیطی مختلف ۲۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آیند. ثابت‌های معادله با کمینه‌سازی مربع خطاهای پیش‌بینی افت ظرفیت با استفاده از روش بهینه‌سازی لونبرگ - مارکواردت [۱۵] محاسبه می‌شود. مجموع مربع خطاهای پیش‌بینی افت ظرفیت ( $ASDE$ ) با معادله (۳) تعریف می‌گردد. در این معادله بالانویس‌های  $Exp.$  و  $Cal.$  به ترتیب برای محاسباتی و آزمایشگاهی استفاده می‌شوند.

$$ASDE = \sum \left( \frac{C_r^{Exp.} - C_r^{Cal.}}{C_r^{Exp.}} \right)^2 \quad (3)$$

تابع هدف ( $OF$ ) در الگوریتم بهینه‌سازی با معادله (۴) نمایش داده شده است.

$$OF = \text{Minimize} (ASDE) \quad (4)$$

نکته مهم در این کار، استفاده از کمترین تعداد داده‌های آزمایشگاهی برای تدوین مدل ریاضی بوده، به شکلی که با توجه به عمر مفید باتری‌های تجاری که برابر چندصد سیکل است، فقط از ده سیکل شارژ و دشارژ بهره برده شده است.

برای محاسبه پارامترهای معادله (۱) بر اساس روش لونبرگ-مارکواردت [۱۵] از ابزار موجود در نرم‌افزار

• پیش‌بینی بر اساس قانون توانی، زوال ظرفیت باتری را در دماهای مختلف تقریب می‌زند و فرض می‌کند که نسبت ظرفیت باقی‌مانده در هر دمایی متناسب با تابع توانی از دماست [۱۰].

مینگ‌هوئی‌هو و همکاران [۱۱] روشی برای تعیین سریع عمر باتری ارائه کردند و بر مبنای رابطه بین ظرفیت باتری، فرمول آرنیوس، دما و جریان شارژ/دشارژ، یک فرمول برازش شده را به دست آوردند تا نرخ افت ظرفیت و سیکل‌های شارژ/دشارژ باتری را پیش‌بینی کنند. این فرمول‌بندی پیشنهادی برای باتری لیتیوم-یونی دارای دقت مناسب و خطای تخمین قابل‌قبولی است.

اشمالتزیگ و همکاران [۱۲] نیز یک مدل پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم-یونی را براساس تست‌های تسریع شده توسعه دادند. به‌منظور بررسی اثر دماهای مختلف روی افت ظرفیت، تست‌های عمر تقویمی<sup>۱</sup> انجام شدند. علاوه بر این، آن‌ها چند تست عمر سیکلی را نیز با استفاده از عمق دشارژهای مختلف انجام دادند. در نهایت، داده‌های تست عمر سیکلی و عمر انبارداری به‌منظور یافتن معادلات ریاضی استفاده شدند که وابستگی زوال باتری به پارامترهای مختلف را مشخص می‌کند.

اگر و همکاران [۱۳] نیز روشی برای پیش‌بینی طول عمر باتری بر اساس یک مدل زوال برای باتری‌های لیتیوم-یونی توسعه بخشیدند. آن‌ها یک آنالیز چندمتغیره از آزمون‌های تسریع شده طول عمر را ارائه و اثر دما و وضعیت شارژ باتری را روی افت ظرفیت بررسی کردند. علاوه بر این، آن‌ها توابع ریاضی حاصل را برای پارامتریزه کردن یک مدل نیمه‌تجربی برای زوال باتری به کار گرفتند.

بنابراین، پیش‌بینی با استفاده از یک قانون تابع ریشه دوم به‌خودی‌خود قادر به احتساب افزایش هر نوع زوال ناشی از تغییرات دمایی نیست و قانون توانی نیز ارتباطی به سیکل‌های شارژ/دشارژ ندارد. در این مطالعه سعی شده مدلی ترکیبی از دو روش ذکر شده برای پیش‌بینی طول عمر باتری ارائه شود، به گونه‌ای که بتوان پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای را به شکل مناسب و با خطایی قابل قبول انجام داد.

### ۳- مدل‌سازی ریاضی

روش‌های مبتنی بر داده‌های تجربی علی‌رغم محدودیت در

<sup>۱</sup> Calendar life

MatLab 2016 استفاده شده است.

#### ۴- روش آزمایشگاهی

ابتدا در هر دما آزمون سیکلی شارژ/دشارژ برای باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ برای ده سیکل صورت گرفته، نسبت کاهش ظرفیت ناشی از هر سیکل در دمای مشخص اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به اهمیت تنظیم دما برای انجام آزمایش‌های ظرفیت از انکوباتور ساخت شرکت پارس‌آزما استفاده شده که بتوان دمای محیطی باتری را در دوره آزمون‌های شارژ و دشارژ تحت کنترل و ثابت نگه داشت. شارژ و دشارژ باتری فرایندی بسیار دقیق و مهم است و برای هر باتری به‌صورت پروتکل تعریف می‌شود. بنابراین، سیکل‌ها بر اساس اطلاعات داده‌برگ باتری سامسونگ مطابق جدول ۱ انجام شده است [۱۶].

جدول ۱- داده‌برگ باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ

|  |                      |
|--|----------------------|
| SAMSUNG  | شرکت سازنده          |
| 2950mAh<br>(0.2C, 2.75V discharge)             | ظرفیت اسمی           |
| 2850mAh<br>(0.2C, 2.75V discharge)             | حداقل ظرفیت          |
| CC-CV  | روش شارژ             |
| 1475 mA  | جریان استاندارد شارژ |
| $4.35 \pm 0.05$ V                              | ولتاژ شارژ           |
| 2.75 V   | ولتاژ قطع دشارژ      |
| 48.0 g max                                     | وزن باتری            |
| Charge : 0 to 45 °C<br>Discharge: -20 to 50 °C | دمای عملیاتی         |

برای اندازه‌گیری ظرفیت در سیکل‌های شارژ/دشارژ از دستگاه تست باتری BTS3000 ساخت شرکت نیوور<sup>۱</sup> استفاده شده که قادر به انجام آزمون‌های مختلف شارژ/دشارژ برای ۸۰ باتری به‌صورت هم‌زمان و ثبت پارامترهای عملیاتی آن‌ها است. شکل (۱) مجموعه آزمایشگاهی تست شارژ/دشارژ باتری لیتیوم-یونی سامسونگ را در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

روش شارژ و دشارژ باتری بر اساس دو مرحله ولتاژ ثابت و جریان ثابت (CC-CV)<sup>۲</sup> انجام می‌شود که یک روش مرسوم برای شارژ باتری‌های لیتیوم-یون است. روش کار بدین‌صورت است که ابتدا باتری با جریان ثابت ۱۴۷۵mA تا ولتاژ ۴/۲ V شارژ می‌شود. سپس مرحله ولتاژ ثابت آغاز شده، شارژ در ولتاژ ثابت ۴/۲ V ادامه پیدا کرده تا اینکه

جریان شارژ به مقدار ۱۴۷/۵ mA کاهش یابد. در این مرحله شارژ باتری خاتمه می‌یابد. پس از اتمام مرحله شارژ، باتری با جریان ثابت ۱۴۷۵ mA تا ولتاژ قطع که برابر ۲/۵ V است، دشارژ می‌شود (شکل ۲). این فرایند به‌منزله یک سیکل کامل شارژ و دشارژ باتری لیتیوم یونی است.



شکل ۱- دستگاه تست باتری BTS3000 ساخت شرکت نیوور به همراه انکوباتور ساخت شرکت پارس‌آزما به‌منظور کنترل دمای محیطی باتری لیتیوم-یونی. (آزمایشگاه باتری پژوهشکده مکانیک)

#### ۵- نتایج و بحث

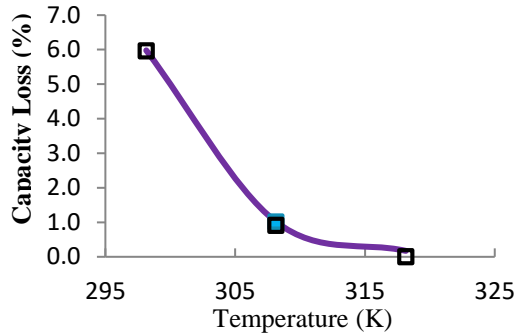
بر اساس توضیحات بخش سوم، سیکل کامل شارژ و دشارژ باتری در دماهای ۲۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده و به‌عنوان نمونه داده‌های آزمایشگاهی دشارژ باتری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و جریان ۱۴۷۵ میلی‌آمپر در شکل (۲) به نمایش گذاشته شده است.

نتایج اندازه‌گیری ظرفیت برای سیکل‌های شارژ و دشارژ ده‌گانه در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد در شکل (۳) و برای اختصار فقط سیکل‌های اول و دهم نمایش داده شده است. با بررسی این نتایج مشخص می‌شود که درصد افت ظرفیت طی ۱۰ سیکل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۵/۹۷٪ بوده که این مقدار برای دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب برابر ۰/۹۱٪ و ۰/۴۶٪ است. افزایش دما سبب افزایش ظرفیت دشارژ شده، ولی سبب کاهش عمر سیکلی می‌شود.

<sup>2</sup> Constant Current- Constant Voltage

<sup>1</sup> Neware

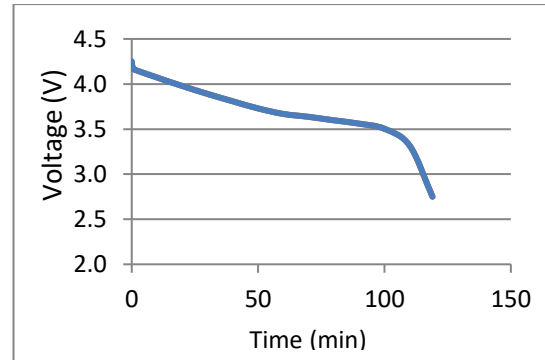
زمانی که ظرفیت به ۷۰٪ ظرفیت اولیه می‌رسد، به دست آورد و با مقایسه با اطلاعات داده‌برگ، اعتبار مدل ارائه‌شده را بررسی کرد. با استفاده از معادله (۵) عمر سیکلی باتری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۵۲ سیکل محاسبه شده که در مقایسه با مقدار ارائه‌شده در داده‌برگ، دارای ۱۵ درصد خطای پیش‌بینی است.



شکل ۴- نمودار  $C_{r,cyc}$  بر حسب  $T$  برای باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ با توجه به داده‌های تجربی ده سیکل ابتدایی در دماهای ۲۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد. علامت‌های □ داده‌های آزمایشگاهی و نمودار پیش‌بینی حاصل از معادله (۵) است.

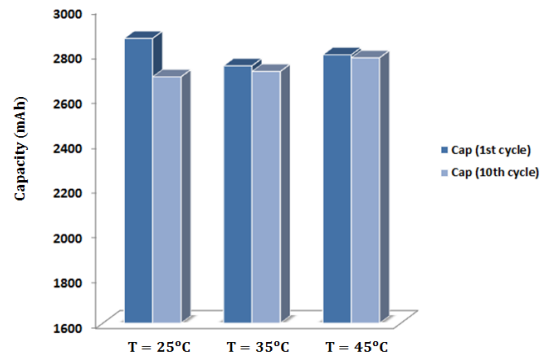
#### ۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر مدلی کاربردی و ساده برای پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم-یون ارائه می‌دهد که مرکب از مفاهیم قانون توان و قانون تابع ریشه دوم است. این مدل، دما و تعداد سیکل را به‌عنوان دو پارامتر مهم و اثرگذار در عمر سیکلی باتری لیتیوم-یون لحاظ می‌کند. برای اعتبارسنجی مدل از باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ استفاده شده است که کاهش ظرفیت طی ده سیکل ابتدایی در دماهای ۲۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد برای این باتری اندازه‌گیری شده، ثابت‌های مدل از داده‌های تجربی بر اساس روش لونبرگ-مارکواردت به دست آمده‌اند. پیش‌بینی مدل ارائه‌شده برای این باتری ۲۵۲ سیکل برای رسیدن ظرفیت به ۷۰٪ ظرفیت اولیه در دمای ۲۵°C بوده که این پیش‌بینی در مقایسه با اطلاعات ارائه‌شده در داده‌برگ سامسونگ دارای ۱۵٪ خطا است.



شکل ۲- نمودار دشارژ باتری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و جریان ۱۴۷۵ میلی‌آمپر

با توجه به تعیین ثابت‌های معادله (۱) مطابق آنچه شرح داده شد، مدل پیش‌بینی طول عمر برای باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ به شکل معادله (۵) خواهد بود:



شکل ۳- کاهش ظرفیت باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای ده سیکل ابتدایی

$$C_{r,cyc} = \frac{1.767 \times 10^{23}}{e^{-0.1774 T} \sqrt{N_{cyc}}} \quad (5)$$

شکل (۴) مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده افت ظرفیت در دماهای مختلف برای ده سیکل با داده‌های پیش‌بینی حاصل از حل معادله (۵) را برای باتری لیتیوم-یونی استوانه‌ای سامسونگ نشان می‌دهد.

طبق اطلاعات ارائه‌شده در داده‌برگ باتری سامسونگ عمر سیکلی باتری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای رسیدن به ۷۰٪ ظرفیت اولیه، برابر با ۲۹۹ سیکل است. بنابراین، با قراردادن  $C_{r,cyc}=30\%$  و  $T=298.15$  K در معادله (۵) می‌توان تعداد سیکل پیش‌بینی شده توسط مدل را برای

#### مراجع

- [1] A. J. Crawford, Q. Huang, M. C. Kintner-Meyer, J.-G. Zhang, D. M. Reed, V. L. Sprenkle and et al., "Lifecycle comparison of selected Li-ion battery chemistries under grid and electric vehicle duty cycle combinations", Journal of Power Sources, vol. 380, 2018, pp. 185-193.

- [2] D. Liu, W. Xie, H. Liao, and Y. Peng, "An integrated probabilistic approach to lithium-ion battery remaining useful life estimation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, 2015, pp. 660-670.
- [3] D. Liu, H. Wang, Y. Peng, W. Xie, and H. Liao, "Satellite lithium-ion battery remaining cycle life prediction with novel indirect health indicator extraction," *Energies*, vol. 6, 2013, pp. 3654-3668.
- [۴] س. احمدی و م.ت. بطحایی، «مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای بهینه مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، ۱۳۹۶، صفحه ۱-۱۶.
- [5] S. Ramakrishnan, S. Venugopalan, and A. E. Jeyakumar, "Prediction of Retained Capacity and EODV of Li-ion Batteries in LEO Spacecraft Batteries", arXiv preprint arXiv:1004.448, 2010.
- [۶] ف. کریمی‌زاد گوهری و ا. شاهشوند و ص. علی‌خان محمدآباد، «بررسی تجربی مدل‌سازی انتقال جرم و انتقال حرارت هم‌زمان در کانال افقی همراه با اثرات دیواره»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۴، ۱۳۹۰، صفحه ۸۴-۹۵.
- [۷] ف. کریمی‌زاد گوهری و ا. شاهشوند، «مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی RBF و MLP و نتایج حاصل از هم‌زمانی پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۳، ۱۳۹۲، صفحه ۲۷-۴۳.
- [8] P. Rong and M. Pedram, "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries", *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 14, 2006, pp. 441-451.
- [9] E. Sarasketa-Zabala, E. Martinez-Laserna, M. Berecibar, I. Gandiaga, L. Rodriguez-Martinez and I. Villarreal, "Realistic lifetime prediction approach for Li-ion batteries", *Applied Energy*, vol. 162, 2016, pp. 839-852.
- [10] M. Abe, K. Nishimura, S. E. Seki, H. Haruna, T. Hirasawa and S. Ito, "Lifetime prediction for heavy-duty industrial lithium-ion batteries that enables highly reliable system design," *Hitachi Review*, vol. 61, 2012, p. 259.
- [11] M. Hu, J. Wang, C. Fu, D. Qin and S. Xie, "Study on Cycle-Life Prediction Model of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 11, 2016, pp. 577-589.
- [12] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker and D. U. Sauer, "From accelerated aging tests to a lifetime prediction model: Analyzing lithium-ion batteries", in *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013 World, 2013, pp. 1-12: IEEE.
- [13] M. Ecker and et al., "Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data", *Journal of Power Sources*, vol. 215, 2012, pp. 248-257.
- [14] V. Ramadesigan, P.W. Northrop, S.De, S. Santhanagopalan, R.D. Braatz and V. R. Subramanian, "Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, 2012, pp. R31-R45.
- [15] D. Marquardt, "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM Journal of Applied mathematics*, vol. 11, 1963, pp. 431-441.
- [16] E. B. Division, "Specification of Product for Lithium-ion Rechargeable Cell- Model : ICR18650-30B", L. Samsung SDI Co. ,first edition, 2010.