

بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی نیمه‌تجربی زمان شارژ باتری لیتیوم-یون با هدف کنترل فرایند شارژ متناسب با جریان‌های گوناگون

محمد زارعی جلیانی، محمد محسن لغوی، محسن بابایی، رحیم اقرء*، محمد سرشار

پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، شیراز، ایران

چکیده: یکی از چالش‌های اصلی در توسعه باتری‌های لیتیوم-یون به ویژه در کاربردهایی مانند خودروهای الکتریکی، زمان شارژ طولانی آن‌ها است و کوتاه‌تر کردن زمان شارژ بسته باتری یک مسئله بحرانی در این زمینه می‌باشد. فرایند شارژ باتری لیتیوم-یون به وسیله یک شارژر جریان ثابت-ولتاژ ثابت صورت می‌پذیرد. شارژ سریع ممکن است با سرعت بخشیدن به زوال باتری، عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهش حاضر مدلی برای پیش‌بینی دقیق زمان شارژ باتری ارائه می‌شود که بر اساس آن در نرخ جریان‌های (C-rate) گوناگون شارژ می‌توان زمان شارژ باتری را برآورد نمود، به طوری که ضریب تشخیص (R^2) برازش‌های انجام‌شده بر اساس مدل برای پنج نمونه باتری لیتیوم-یون مورد بررسی بیش از ۰/۹۹ می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب نتیجه‌های تجربی با پیش‌بینی‌های مدل پیشنهادی است. از آنجا که مرحله ولتاژ ثابت در فرایند شارژ باتری لیتیوم-یون تا زمانی ادامه می‌یابد که شدت جریان تا مقدار مشخصی کاهش یابد در نتیجه در صورت تشخیص‌ندادن کاهش شدت جریان در مرحله ولتاژ ثابت، شاهد شارژ بیش از حد باتری خواهیم بود. هم‌چنین در صورت اختلال در سامانه باتری ممکن است جریان در مرحله ولتاژ ثابت با یک روال مشخص افت نکند که این موضوع نیز باعث شارژ بیش از حد باتری و در نتیجه کاهش ظرفیت آن خواهد شد. پس با در اختیار داشتن یک برآورد درست از زمان شارژ باتری می‌توان هر دو مرحله شارژ (جریان ثابت و ولتاژ ثابت) را به وسیله زمان محدود کرد تا در هنگام شارژ سریع، زوال بیش‌تری بر سامانه باتری لیتیوم-یون تحمیل نشود و از بروز هرگونه مشکل یا خرابی به علت شارژ بیش از حد باتری جلوگیری شود.

واژگان کلیدی: باتری لیتیوم-یون، مدل‌سازی، زمان شارژ، نرخ جریان، شارژر، خودروی برقی

KEYWORDS: Lithium-ion battery, Modeling, Charging time, Flow rate, Charger, Electric car

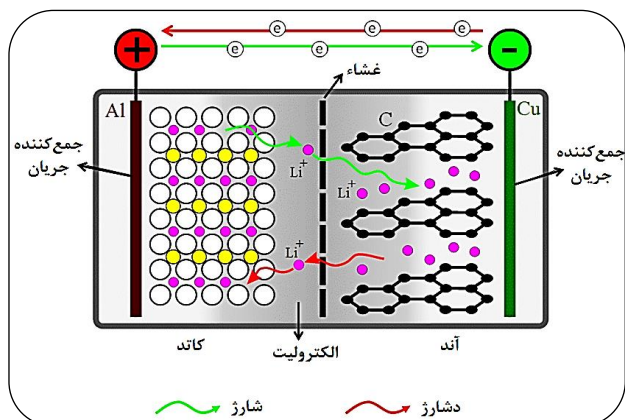
مقدمه

الکتریکی است، نقش سوخت در خودروهای قدیمی را بازی مینکند. به‌تازگی باتری‌های لیتیوم-یون پیشرفته برای استفاده در خودروهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که دارای ولتاژ و ظرفیت

وسایل نقلیه الکتریکی به‌عنوان جایگزینی امیدبخش و سازگار با محیط‌زیست برای خودروهای بنزینی شناخته می‌شوند. در قلب هر خودروی الکتریکی یک بسته باتری که تأمین‌کننده توان موتورهای

*Email: eqra_1343@yahoo.com

*عهده‌دار مکاتبات



شکل ۱ - نمایش عملکرد یک باتری لیتیوم-یون در فرایند شارژ و دشارژ

شارژ/دشارژ را در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس برای یک نمونه باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای تجاری اندازه‌گیری کردند. زارعی جلیانی و همکاران براساس این داده‌های تجربی مدلی مرکب از مفهوم‌های قانون توانی و قانون تابع ریشه دوم را برای پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم-یون ارائه کردند که تابعی از دما و تعداد سیکل بود. آن‌ها پارامترهای مدل را بر اساس روش مارکوارت-لونبرگ با کمینه‌سازی مربع خطای پیش‌بینی داده‌های تجربی به دست آوردند. این مدل با وجود این که تنها از داده‌های ده سیکل آغازین استفاده کرده است دارای بیشینه خطای ۱۵٪ برای پیش‌بینی بیشینه سیکل شارژ/دشارژ در نقطه زوال می‌باشد.

یکی از چالش‌های اصلی در توسعه خودروهای برقی، زمان شارژ طولانی آن‌ها است که یک مسئله بحرانی در ارائه یک روش شارژ سریع به‌منظور کوتاه‌تر کردن زمان شارژ بسته باتری (حدود ۶ تا ۸ ساعت) می‌باشد [۱۳]. این فرایند شارژ به‌وسیله یک شارژر جریان ثابت-ولتاژ ثابت^۱ (CC-CV) صورت می‌پذیرد [۱۴]. در روش شارژ CC-CV باتری با یک جریان ثابت شارژ می‌شود تا ولتاژ سل به ۴/۱ V یا ۴/۲ V برسد، سپس روش شارژ به ولتاژ ثابت تغییر می‌کند تا این که جریان به مقدار از پیش تعیین‌شده‌ای کاهش یابد [۱۵، ۱۶]. شارژ سریع ممکن است با سرعت بخشیدن به زوال باتری، عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع به آن دلیل است که شارژ سریع با نرخ جریان‌های بالا و در نتیجه دماهای بالا همراه است که به عبارتی فاکتورهای اصلی زوال باتری لیتیوم-یون هستند [۱۷-۱۹]. زوال زود هنگام باتری لیتیوم-یون اثرهای منفی بر عملکرد خودرو الکتریکی خواهد داشت. بنابراین برای این که خودروی برقی بدون کاهش عملکرد به سرعت شارژ شود لازم است که فاکتورهای فنی

بالاتری نسبت به دیگر فناوری‌های باتری (از جمله باتری‌های سرب اسید، نیکل کادمیوم و نیکل-هیدرید فلزی) هستند [۶-۱].

شکل ۱ قاعده اصلی عملکرد یک باتری لیتیوم-یون را نشان می‌دهد. یک الکترولیت هادی یون (دارای نمک لیتیومی در حلال‌های آلی) بین دو الکتروود واقع شده است. جداکننده نیز یک غشای متخلخل می‌باشد که به صورت الکتریکی دو الکتروود را از هم جدا می‌سازد. یون‌های لیتیوم طی فرایند شارژ و دشارژ بین الکتروودهای آندی و کاتدی باتری مهاجرت کرده و درون مواد فعال درج و حذف می‌شوند. به‌عنوان نمونه طی فرایند دشارژ، هنگامی که یون لیتیوم از الکتروود منفی خارج می‌شود، الکترون‌ها آزاد می‌شوند. در الکتروود آند به‌طور عمده گرافیت و ترکیب‌های بی شکل کربن به عنوان ماده فعال به کار می‌رود. الکتروود کاتد نیز شامل مواد فعالی چون اکسیدهای فلزی است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است طی فرایند دشارژ، یون‌های لیتیوم از الکتروود آند و به وسیله الکترولیت و با عبور از غشا به سمت الکتروود کاتد مهاجرت می‌کنند. در همین زمان، الکترون‌ها به‌عنوان حامل الکتریسیته توسط یک اتصال الکتریکی خارجی (کابل) از الکتروود آند به الکتروود کاتد مهاجرت می‌کنند. طی شارژ، این فرایند وارون می‌شود یعنی یون‌های لیتیوم از الکتروود کاتد و به وسیله الکترولیت با عبور از غشا به الکتروود آند مهاجرت می‌کنند [۷-۱۱].

بسته به نوع کاربرد، یک سل به صورت منفرد به کار می‌رود یا این که چندین سل به صورت متوالی در یک پودمان به هم متصل می‌شوند. هم‌چنین با توجه به ظرفیت مورد نیاز، اتصال موازی سل‌ها نیز امکان‌پذیر است. چندین پودمان به هم متصل شده، یک سامانه باتری را تشکیل می‌دهند.

اگرچه خودروهای برقی یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای کاهش آلودگی‌های مربوط به وسایل نقلیه می‌باشند، ولی تحقق و پایداری این فناوری مستلزم مطالعه‌های بنیادین بسیار روی باتری خودروهای الکتریکی است تا بتوان بر چالش‌های موجود در این زمینه چیره شد. یکی از راه‌کارهای سودمند برای بررسی و رفع چالش‌های باتری‌های لیتیوم-یون، مدل‌سازی پارامترهای اساسی باتری با توجه به داده‌های تجربی می‌باشد. به‌عنوان نمونه زارعی جلیانی و همکاران [۱۲] یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی باتری‌های لیتیوم-یون یعنی مقدار افت ظرفیت باتری طی سیکل‌های شارژ/دشارژ را بر مبنای داده‌های تجربی مدل‌سازی نمودند. آن‌ها داده‌های آزمایشگاهی برای کاهش ظرفیت باتری طی ده سیکل

(۱) Constant Current-Constant Voltage

از زمان شارژ باتری می‌توان هر دو مرحله شارژ (ولتاژ ثابت و جریان ثابت) را به وسیله زمان محدود کرد تا از بروز هر گونه مشکل یا خرابی به علت شارژ بیش از حد باتری جلوگیری نمود. علاوه بر این در طراحی شارژرهایی با قابلیت شارژ با C-rate های گوناگون با استفاده از مدل پیش‌بینی زمان شارژ باتری می‌توان در هر نرخ جریان مشخص زمان باقی مانده شارژ را به کاربر ارایه داد.

بخش تجربی

در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی زمان شارژ باتری لیتیوم-یون، پنج سل سکه‌ای با کاتدهای گوناگون A، B، C، D و E بر پایه لیتیوم اکسید نیکل کبالت آلومینیوم (که مشخصه‌های آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است) و آند گرافیت مونتاژ شده‌اند. همچنین از یک غشای پلیمری به‌عنوان جداکننده کاتد و آند استفاده شده است. سل‌های سکه‌ای مونتاژ شده در اندازه استاندارد ۲۰۳۲ (قطر ۲۰ mm و ضخامت ۳/۲ mm) می‌باشند. هر سل در هر یک از نرخ‌های جریان C/۱، C/۲، C/۵، C و ۱ C و ۲ C پنج چرخه شارژ/دشارژ را طی کرده است. فرایند شارژ/دشارژ باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای به صورت زیر می‌باشد. فرایند شارژ:

- شارژ با جریان ثابت تا رسیدن ولتاژ به ۴/۲ V
 - شارژ با ولتاژ ثابت ۴/۲ V تا کاهش جریان به مقداری معادل C/۰.۱
 - فرایند دشارژ:
 - دشارژ با جریان ثابت تا رسیدن ولتاژ به ۲/۸ V
- آزمون شارژ/دشارژ باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای توسط دستگاه تست باتری BTS8000 (شرکت نیوور) و در دمای محیط (۲۵ °C) انجام شده است.

نتیجه‌ها و بحث

شکل ۲ پروفیل ولتاژ شارژ بر حسب زمان در نرخ جریان‌های گوناگون برای یک نمونه از باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی (سل B) را نشان می‌دهد. بدیهی است که با افزایش نرخ جریان شارژ، زمان کلی شارژ باتری لیتیوم-یون کاهش می‌یابد. نکته‌ای که از شکل ۲ قابل استنباط می‌باشد این است که با افزایش C-rate، زمان شارژ در مرحله جریان ثابت کاهش یافته ولی زمان

جدول ۱ - ترکیب درصد وزنی انواع کاتدهای استفاده شده در ساخت سل‌های سکه‌ای

نام کاتد	ماده فعال لیتیوم اکسید نیکل کبالت آلومینیوم (%)	افزودنی رسانای کربن سیاه (%)	ماده چسباننده پلی-وینیلیدین فلورئورید (%)
A	۹۰	۱	۹
B	۹۰	۲	۸
C	۹۰	۳	۷
D	۹۰	۴	۶
E	۹۰	۵	۵

شارژ سریع باتری مورد آنالیز قرار گیرند تا زوال بیش‌تری بر سامانه باتری لیتیوم-یون تحمیل نشود. در این بین یکی از چالش‌های اساسی مسئله شارژ بیش از حد می‌باشد که می‌تواند باعث افزایش دما، تجزیه الکترولیت و آزادسازی گاز شود [۲۰، ۲۱]. طبق مطالعه انجام شده توسط وانگ و همکاران، سازوکار تولید گرمای الکتروود مثبت با الکترولیت باعث می‌شود پایداری ماده الکتروودی کاهش یافته و دما افزایش یابد. این فرایند منجر به تجزیه ماده الکتروودی مثبت و آزادسازی اکسیژن طی فرایند شارژ می‌شود. اکسیژن به دست آمده با الکترولیت و الکتروود منفی واکنش داده و باعث انتشار چشمگیر گرما و تولید گاز می‌شود، که این مسئله خطر نارسایی گرمایی را افزایش می‌دهد [۲۲].

از آن‌جا که کاهش زمان شارژ باتری همواره از موضوعاتی است که مورد توجه بوده است، پژوهش‌های متعددی در زمینه روش‌های شارژ سریع باتری‌های لیتیوم-یونی ارایه شده‌اند [۱۶، ۲۳] تا عملکرد شارژ باتری را با جریان بالا بهبود بخشند. با این حال در چنین پژوهش‌هایی مدل‌سازی و پیش‌بینی زمان شارژ باتری در مرحله‌های گوناگون (از جمله مرحله جریان ثابت و ولتاژ ثابت) مورد توجه قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر مدلی برای پیش‌بینی دقیق زمان شارژ باتری ارایه می‌شود که در نرخ جریان‌های (C-rate) گوناگون شارژ می‌توان زمان شارژ باتری را برآورد نمود. از آن‌جا که مرحله ولتاژ ثابت در فرایند شارژ باتری لیتیوم-یون تا زمانی ادامه می‌یابد که جریان به مقدار مشخصی افت کند، چنان‌چه به هر علت شارژر باتری مقدار جریان در مرحله ولتاژ ثابت را تشخیص ندهد موجب شارژ بیش از حد باتری خواهد شد. همچنین در صورت اختلال در سامانه باتری ممکن است جریان در مرحله ولتاژ ثابت با یک روال مشخص افت نکند که این موضوع نیز باعث شارژ بیش از حد باتری و در نتیجه زوال ظرفیت آن خواهد شد. پس با در اختیار داشتن یک برآورد درست

(۱) Neware

جدول ۲ - پارامترهای به دست آمده از مدل سازی زمان شارژ مرحله جریان ثابت برای ۵ باتری لیتیوم-یون سکه‌ای مونتاژ شده

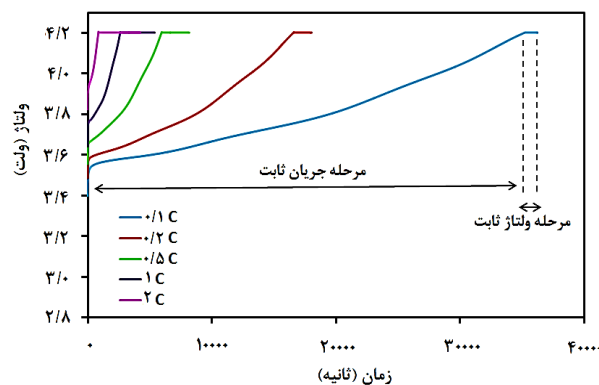
کد باتری سکه‌ای	Acc (s)	Zcc	R ²
A	۲۳۰۳/۶	-۱/۲۲۰	۰/۹۹۳۶
B	۲۳۳۲/۳	-۱/۲۱۴	۰/۹۹۴۱
C	۲۳۹۱/۴	-۱/۲۰۵	۰/۹۹۳۹
D	۲۵۶۲/۲	-۱/۱۵۸	۰/۹۹۸۸
E	۲۵۶۳/۵	-۱/۱۶۶	۰/۹۹۸۲

شکل ۴ نمودار زمان شارژ مرحله جریان ثابت (tcc) برحسب C-rate را برای پنج باتری لیتیوم-یون سکه‌ای A, B, C, D و E نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است با افزایش C-rate مقدار tcc به صورت توانی کاهش یافته است. نتیجه‌های برازش‌ها برای هر پنج باتری لیتیوم-یون سکه‌ای نشان می‌دهد مدل دارای ضریب تشخیص (R²) بیش از ۰/۹۹ می‌باشد که نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب مدل با نتیجه‌های تجربی است. جدول ۲ مقدار پارامترهای Acc و Zcc برای ۵ باتری سکه‌ای مونتاژ شده را نشان می‌دهد.

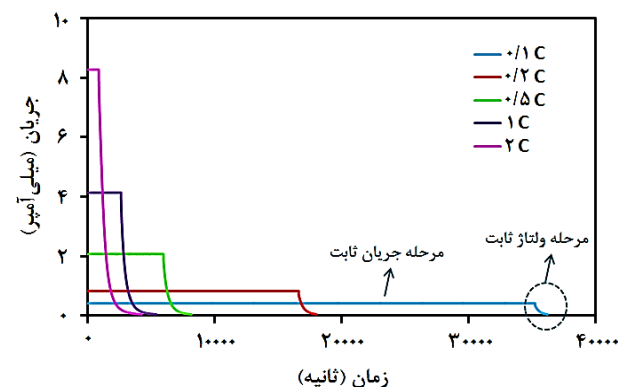
با توجه به جدول ۲ از آنجا که پارامتر Acc دارای بعد زمان می‌باشد بنابراین همواره عددی مثبت خواهد بود. افزون بر این از آنجا که با توجه به نتیجه‌های آزمون‌های شارژ/دشارژ در نرخ جریان‌های گوناگون، مقدار tcc با افزایش C-rate کاهش می‌یابد بنابراین پارامتر Zcc نیز عددی منفی خواهد بود. بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمون شارژ/دشارژ باتری‌های لیتیوم-یونی سکه‌ای، زمان شارژ مرحله ولتاژ ثابت نیز با استفاده از معادله (۲) مدل سازی شده است.

$$t_{CV} = A_{CV} \times (C_rate)^{Z_{CV}} \quad (2)$$

در معادله (۲) پارامتر tcv زمان شارژ مرحله ولتاژ ثابت و C-rate نرخ جریان شارژ می‌باشد. پارامترهای A_{CV} و Z_{CV} نیز ثابت‌های مدل می‌باشند که به وسیله برازش داده‌های تجربی به دست می‌آیند. شکل ۵ نمودار زمان شارژ مرحله ولتاژ ثابت (t_{CV}) برحسب C-rate را برای پنج باتری لیتیوم-یون سکه‌ای A, B, C, D و E نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است با افزایش C-rate مقدار t_{CV} به صورت توانی افزایش یافته است. نتیجه‌های برازش‌ها برای هر پنج باتری لیتیوم-یون سکه‌ای نشان می‌دهد مدل دارای ضریب تشخیص (R²) بیش از ۰/۹۹ می‌باشد که نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب مدل با نتیجه‌های تجربی است. جدول ۳ مقدارهای پارامترهای A_{CV} و Z_{CV} برای ۵ باتری سکه‌ای مونتاژ شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - پروفیل ولتاژ شارژ بر حسب زمان در نرخ جریان‌های گوناگون برای یک نمونه از باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی (سل B)

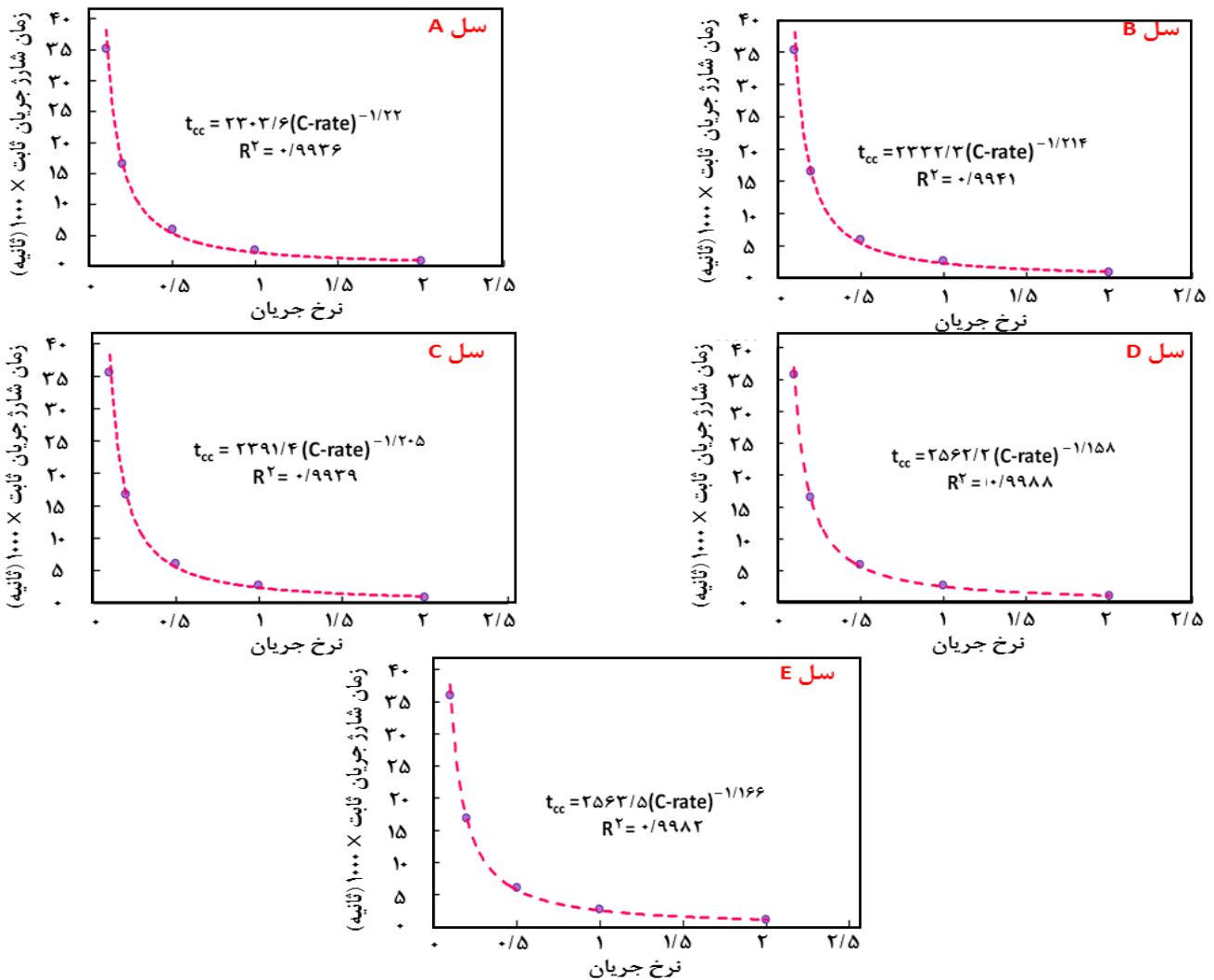


شکل ۳ - پروفیل جریان شارژ بر حسب زمان در C-rate های گوناگون برای یک نمونه از باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی (سل B)

شارژ در مرحله ولتاژ ثابت افزایش می‌یابد. شکل ۳ نیز پروفیل جریان شارژ بر حسب زمان در C-rate های گوناگون برای یک نمونه از باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی (سل B) را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است در مرحله شارژ ولتاژ ثابت، جریان به صورت نمایی کاهش یافته است و هر چه بر C-rate افزوده می‌شود، زمان شارژ در مرحله ولتاژ ثابت نیز افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمون شارژ/دشارژ باتری‌های لیتیوم-یون سکه‌ای، زمان شارژ مرحله جریان ثابت با استفاده از معادله (۱) مدل سازی شده است.

$$t_{CC} = A_{CC} \times (C_rate)^{Z_{CC}} \quad (1)$$

در معادله (۱) پارامتر tcc زمان شارژ مرحله جریان ثابت و C-rate نرخ جریان شارژ می‌باشد. پارامترهای Acc و Zcc نیز ثابت‌های مدل می‌باشند که به وسیله برازش داده‌های تجربی به دست می‌آیند.



شکل ۴ - نمودار زمان شارژ مرحله جریان ثابت برحسب C-rate برای پنج باتری لیتیوم-یونی سکه‌ای مورد بررسی (نقطه‌های آبی رنگ مقادیرهای تجربی و خط‌چین مدل پیش‌بینی زمان شارژ در مرحله جریان ثابت را نشان می‌دهد)

چون مقدار t_{cv} با افزایش C-rate افزایش می‌یابد بنابراین پارامتر Z_{cv} نیز عددی مثبت خواهد بود.

زمان کلی شارژ باتری لیتیوم-یون به صورت CC-CV (جریان ثابت-ولتاژ ثابت) را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان نمود.

$$t_{chg} = t_{cc} + t_{cv} \quad (3)$$

بنابراین با جای‌گذاری معادله‌های (۱) و (۲) در معادله (۳) خواهیم داشت.

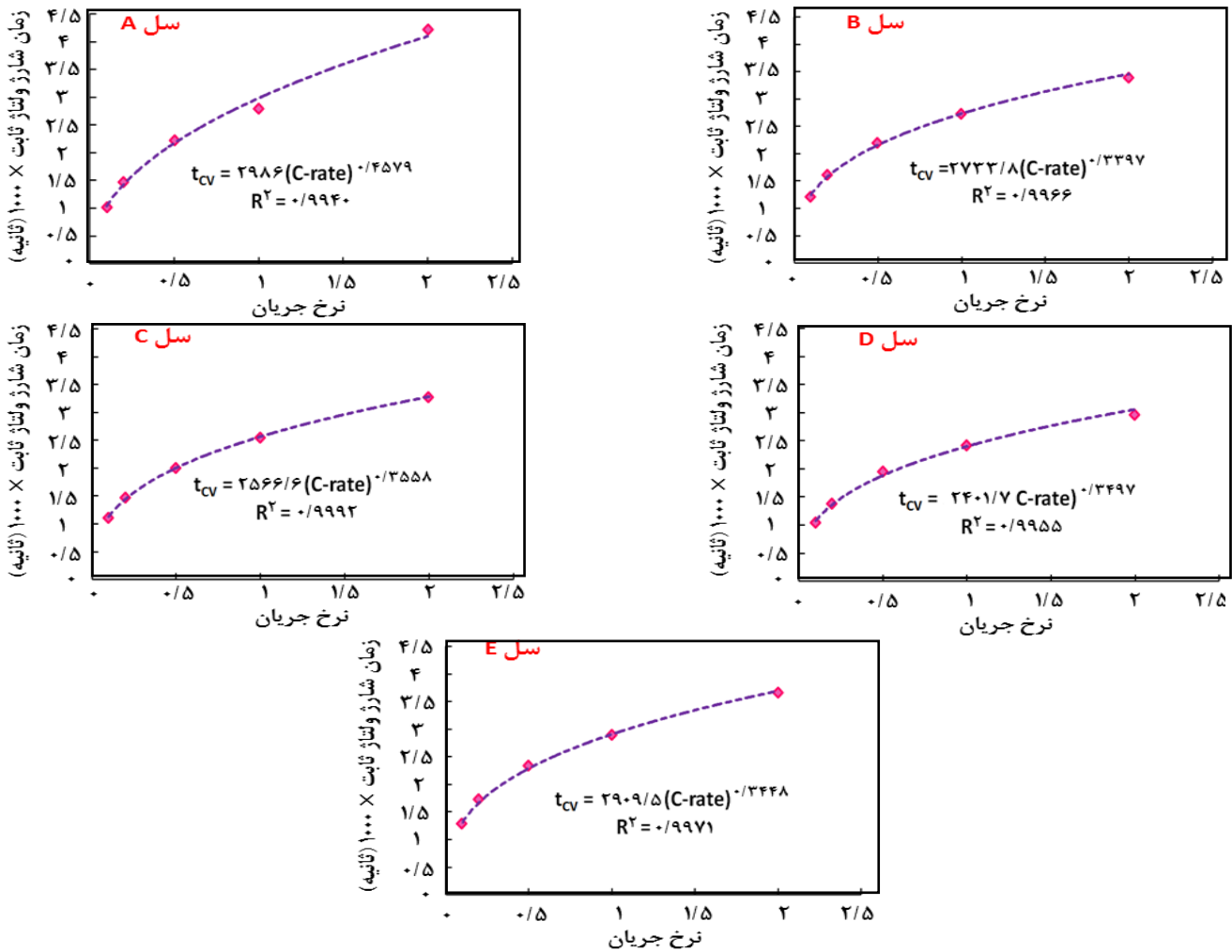
$$t_{chg} = A_{cc} \times (C\text{-rate})^{Z_{cc}} + A_{cv} \times (C\text{-rate})^{Z_{cv}} \quad (4)$$

معادله (۴) زمان کلی شارژ باتری لیتیوم-یون را به صورت مجموع دو جمله توانی و تابعی از پارامتر نرخ جریان شارژ نشان می‌دهد.

جدول ۳ - پارامترهای به دست آمده از مدل‌سازی زمان شارژ مرحله ولتاژ ثابت برای ۵ باتری لیتیوم-یون سکه‌ای مونتاژ شده

کد باتری سکه‌ای	A_{cv} (s)	Z_{cv}	R^2
A	۲۹۸۶	-۰/۴۵۷۹	۰/۹۹۴۰
B	۲۷۳۳/۸	-۰/۳۳۹۷	۰/۹۹۶۶
C	۲۵۶۶/۶	-۰/۳۵۵۸	۰/۹۹۹۲
D	۲۴۰۱/۷	-۰/۳۴۹۷	۰/۹۹۵۵
E	۲۹۰۹/۵	-۰/۳۴۴۸	۰/۹۹۷۱

با توجه به جدول ۲ از آن‌جا که پارامتر A_{cv} دارای بعد زمان است بنابراین همواره عددی مثبت خواهد بود. افزون بر این با توجه به نتیجه‌های آزمون‌های شارژ/دشارژ در نرخ جریان‌های گوناگون،



شکل ۵ - نمودار زمان شارژ مرحله ولتاژ ثابت برحسب C-rate برای پنج باتری لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی (نقاط قرمز رنگ مقادیرهای تجربی و خط چین مدل پیش‌بینی زمان شارژ در مرحله ولتاژ ثابت را نشان می‌دهد)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی زمان شارژ باتری لیتیوم-یون، پنج سل سکه‌ای با کاتدهای گوناگونی بر پایه نیکل کبالت آلومینیوم اکسید و آند گرافیت مونتاژ شده‌اند. هر سل در هر یک از نرخ‌های جریان $C/1$ ، $C/2$ ، $C/5$ ، C و $2C$ پنج چرخه شارژ/دشارژ را طی کرده است. بررسی زمان شارژ در دو مرحله ولتاژ ثابت و جریان ثابت نشان می‌دهد که با افزایش C-rate مقدار t_{cc} به صورت توانی کاهش و مقدار t_{cv} به صورت توانی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان برای حالتی که باتری لیتیوم-یون به صورت ولتاژ ثابت-جریان ثابت به طور کامل شارژ می‌شود، زمان شارژ را به صورت مجموع دو ترم نمایی برحسب C-rate در نظر گرفت

جمله اول معادله (۴) بیان‌گر زمان شارژ در مرحله جریان ثابت و جمله دوم نشان‌دهنده زمان شارژ در مرحله ولتاژ ثابت است. بنابراین مدل ارائه‌شده برای زمان کلی شارژ باتری لیتیوم-یون دارای چهار ثابت t_{cv} ، t_{cc} ، t_{cv} و t_{cc} می‌باشد. ثابت‌های مدل را می‌توان بر اساس آزمون‌های شارژ/دشارژ در C-rate های گوناگون و براساس داده‌های زمان شارژ ولتاژ ثابت و جریان ثابت به دست آورد.

ثابت‌های t_{cv} و t_{cc} دارای بعد زمان بوده و اعدادی مثبت می‌باشند. علاوه‌براین ثابت t_{cc} عددی منفی و ثابت t_{cv} عددی مثبت خواهد بود. معادله (۴) برای هر نوع باتری لیتیوم-یون قابل استفاده است و می‌توان برای هر باتری لیتیوم-یون ثابت‌های مدل را از داده‌های تجربی استخراج نمود.

با نرخ جریان‌های گوناگون را دارند می‌توان از مدل ارائه‌شده برای کنترل فرایند شارژ استفاده نمود. افزون‌براین بر اساس مدل پیش‌بینی زمان شارژ باتری لیتیوم-یون، می‌توان زمان مورد نیاز برای شارژ در هر C-rate را به کاربر ارائه داد.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از پژوهشگاه فضایی ایران برای حمایت مالی از پژوهش حاضر قدردانی می‌کنند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

که جمله اول مربوط به زمان شارژ جریان ثابت و ترم دوم مربوط به زمان شارژ ولتاژ ثابت می‌باشد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده زمان شارژ را برای پنج سل لیتیوم-یون سکه‌ای مورد بررسی با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی می‌کند و ضریب تشخیص (R^2) برای همه برازش‌ها بزرگ‌تر از ۰/۹۹ است. با استفاده از مدل ارائه‌شده برای زمان شارژ باتری لیتیوم-یون می‌توان برآورد دقیقی از زمان شارژ باتری در نرخ جریان‌های گوناگون داشت و در زمان شارژ باتری با جریان‌های بالا با محدود کردن زمان شارژ باتری افزون بر شارژ کامل باتری از خرابی‌هایی که به علت شارژ بیش از حد جلوگیری نمود. هم‌چنین در طراحی شارژرهایی که قابلیت شارژ

مراجع

- [1] Kim D.-R., Kang J.-W., Eom T.-H., Kim J.-M., Lee J., Won C.-Y., *An Adaptive Rapid Charging Method for Lithium-Ion Batteries with Compensating Cell Degradation Behavior*, *Applied Sciences*, **8(8)**: 1251 (2018).
- [2] Sarshar M., Zarei-Jelyani M., Babaiee M., *Application of Semi Empirical and Multiphysics Models in Simulating Lithium Ion Battery Operation*, in "The 10th International Chemical Engineering Congress and Exhibition" (2018).
- [3] Sadeghi B., Sarraf-Mamoory R., Shahverdi H. R., *The Effect of LiFePO₄ Coating on Electrochemical Performance of LiMn₂O₄ Cathode Material*, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **31(4)**: 29-33 (2012).
- [4] کریمی پ، سنچولی م، مطالعه قابلیت نانو ساختارهای بر پایه گرافن به عنوان باتری‌های یون سدیم، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴): ۳۸ تا ۲۳ تا ۳۰ (۱۳۹۸).
- [5] معلی ع، نوعی م، خضعلی ف، مالکی ا، اثر میدان الکتریکی بر عملکرد باتری یون سدیم بر مبنای آند بور-نیتريد با استفاده از نظریه تابع چگالی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳): ۴۰ تا ۱۲۱ تا ۱۲۸ (۱۴۰۰).
- [6] علیزاده ر، عابدینی س، نبی بیدهندی غ، عموعابدینی ق، حذف فلز سرب از پساب صنایع باتری‌سازی با استفاده از نانوذرات مغناطیسی آهن، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱): ۳۰ تا ۷۱ تا ۷۷ (۱۳۹۰).
- [7] Zarei-Jelyani M., Babaiee M., Baktashian S., Eqra R., *Unraveling the Role of Binder Concentration on the Electrochemical Behavior of Mesocarbon Microbead Anode in Lithium-Ion Batteries: Understanding the Formation of the Solid Electrolyte Interphase*, *Journal of Solid State Electrochemistry*, **23(10)**: 2771-2783 (2019).
- [8] زارعی جلیانی م، بکتاشیان ش، بابایی م، قاسمی ع، اقرء ر، بررسی الکتروشیمیایی تشکیل لایه SEI در فرایند فرماسیون آند گرافیت طبیعی در باتری لیتیوم-یون، *مجله مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین*، (۲۶): ۷ تا ۱۸۲۵ تا ۱۸۳۳ (۱۳۹۷).
- [9] Loghavi M.M., Askari M., Babaiee M., Ghasemi A., *Improvement of the Cyclability of Li-Ion Battery Cathode using a Chemical-Modified Current Collector*, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **841**: 107-110 (2019).

- [10] Dehghan F., Mohammadi-Manesh H., Loghavi M.M., [Investigation of Lithium-Ion Diffusion in LiCoPO 4 Cathode Material by Molecular Dynamics Simulation](#), *Journal of Structural Chemistry*, **60(5)**: 727-735 (2019).
- [11] Zarei-Jelyani M., Baktashian S., Babaiee M., Eqra R., [Improved Mechanical and Electrochemical Properties of Artificial Graphite Anode using Water-Based Binders in Lithium-Ion Batteries](#), *Journal of Renewable Energy and Environment*, **5(4)**: 34-39 (2018).
- [۱۲] زارعی جلیانی م.، سرشار م.، بابایی م.، قاسمی ع.، [مطالعه آزمایشگاهی و تدوین مدل تجربی افت ظرفیت باتری لیتیوم یون فضایی، مجله مدل سازی در مهندسی، \(۵۵\) ۱۶: ۳۵ تا ۴۰، \(۱۳۹۷\).](#)
- [13] Zaghbi K., Dontigny M., Guerfi A., Charest P., Rodrigues I., Mauger A., Julien C.M., [Safe and Fast-Charging Li-Ion Battery with Long Shelf Life for Power Applications](#), *Journal of Power Sources*, **196(8)**: 3949-3954 (2011).
- [14] Ernst C.-S., Hackbarth A., Madlener R., Lunz B., Sauer D. U., Eckstein L., [Battery Sizing for Serial Plug-in Hybrid Electric Vehicles: a Model-based Economic Analysis for Germany](#), *Energy Policy*, **39(10)**: 5871-5882 (2011).
- [15] Liu Y.-H., Teng J.-H., Lin Y.-C., [Search for an Optimal Rapid Charging Pattern for Lithium-Ion Batteries using Ant Colony System Algorithm](#), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **52(5)**: 1328-1336 (2005).
- [16] Purushothaman B., Landau U., [Rapid Charging of Lithium-Ion Batteries using Pulsed Currents a Theoretical Analysis](#), *Journal of The Electrochemical Society*, **153(3)**: 533-542 (2006).
- [17] Vetter J., Novák P., Wagner M.R., Veit C., Möller K.C., Besenhard J.O., Winter M., Wohlfahrt-Mehrens M., Vogler C., Hammouche A., [Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries](#), *Journal of Power Sources*, **147(1-2)**: 269-281 (2005).
- [18] Zarei-Jelyani M., Sarshar M., Babaiee M., Tashakor N., [Development of Lifetime Prediction Model of Lithium-Ion Battery Based on Minimizing Prediction Errors of Cycling and Operational Time Degradation using Genetic Algorithm](#), *Journal of Renewable Energy and Environment*, **5(3)**: 60-63 (2018).
- [19] Mousavi Safavi S. M., Kiani M. A., [Supercapacitive Performance of Ordered Mesoporous Carbon \(CMK-3\) in Neutral Aqueous Electrolyte](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **37(2)**: 103-109 (2018).
- [20] Ouyang D., Chen M., Huang Q., Weng J., Wang Z., Wang J., [A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures](#), *Applied Sciences*, **9(12)**: 2483 (2019).
- [21] Zhao J., Rao Z., Huo Y., Liu X., Li Y., [Thermal Management of Cylindrical Power Battery Module for Extending the Life of New Energy Electric Vehicles](#), *Applied thermal engineering*, **85**: 33-43 (2015).
- [22] Wang Q., Sun J., Chen X., Chu G., Chen C., [Effects of Solvents and Salt on the Thermal Stability of Charged LiCoO₂](#), *Materials Research Bulletin*, **44(3)**: 543-548 (2009).
- [23] Lin C.H., Chen C.L., Lee Y.H., Wang S.J., Hsieh C.Y., Huang H.W., Chen K.H., [Fast Charging Technique for Li-Ion Battery Charger](#), in *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 618-621 (2008).