

طراحی سیستم خنک کاری برای باتری لیتوم- یون در نرخ دشارژهای مختلف با مدل سازی الکتریکی- حرارتی

علی میرمحمدی*
استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، mirmohammadi.ali@gmail.com
سعید الهیاری
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، saeedallahyari_s4@yahoo.com

چکیده

استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به جای سوخت های فسیلی می تواند مشکلات زیست محیطی را کاهش دهد. باتری ها در این میان به عنوان ذخیره کننده های انرژی می توانند نقش مهمی ایفا کنند. باتری های لیتوم-یون به دلیل چگالی انرژی بالا و طول عمر زیاد در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. استفاده از خودروهای الکتریکی برای جلوگیری از آلودگی هوا در کشورهای مختلف در حال گسترش است. موتورهای الکتریکی که با باتری کار می کنند، در این خودروها به جای موتورهای درون سوز استفاده می شوند. در این مقاله یک نمونه باتری لیتوم-یون مدل سازی الکتریکی و حرارتی شده است. افزایش دما و کاهش ولتاژ باتری در هنگام دشارژ آن با حل معادلات حاکم مشخص شد. معادله انرژی و معادلات الکتریکی با استفاده از روش حجم محدود با کمک دینامیک سیالات محاسباتی حل عددی شد. نتایج نشان داد در نرخ جریان دشارژ باتری برابر با ۱C، دمای باتری به ۵۴ درجه سلسیوس و در نرخ جریان دشارژ ۲C دمای باتری به ۸۳ درجه سلسیوس می رسد که این دماها می تواند موجب آسیب رسیدن به باتری شود. برای جلوگیری از این مشکل یک سیستم خنک کاری طراحی شد که با عبور جریان آب با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و با دمای ۲۵ درجه سلسیوس، دمای باتری در نرخ دشارژ ۱C به ۳۱ درجه سلسیوس و در نرخ دشارژ ۲C به ۴۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. همچنین برای خنک کاری بیشتر، جریان آب با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و دمای ۱۵ درجه سلسیوس آزمایش شد و در نتیجه آن دمای باتری در نرخ دشارژ ۲C به ۳۷ درجه سلسیوس کاهش یافت که این دما در محدوده مجاز قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: باتری لیتوم-یون، دشارژ، طراحی، سیستم خنک کاری، مدل سازی، الکتریکی-حرارتی.

Design of cooling system for lithium ion battery at different discharge rates with thermal electrical modeling

A. Mirmohammadi
Department of Mechanical Engineering , Shahid Rajace Teacher Training University, Tehran, Iran
S. Allahyari
Department of Mechanical Engineering , Shahid Rajace Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

Using renewable energies instead of fossil fuels can reduce environmental problems. In this way, batteries can play an important role as energy storage. Lithium-ion batteries have been very much considered in recent years due to their high energy density and long life time. The use of electric vehicles is increasing to prevent air pollution in various countries. In these cars, electric motors that work with batteries are used instead of internal combustion engines. In this paper, a lithium-ion battery was modeled electrically and thermally. It was indicated the temperature increase and the battery voltage decrease in discharging process. The numerical solution of the energy and electrical equation was made using a finite volume method in computational fluid dynamics. The results showed that when the battery is discharged at a discharge rate of 1c, the battery temperature reaches 54°C and at a discharge rate of 2c, the battery temperature reaches 83°C, which can damage the battery. To avoid this problem, a cooling system was designed which, with a flow rate of 0.2 m / s and 25°C at a discharge rate of 1c cooled battery to 31°C and at a discharge rate of 2c to 40°C. To increase cooling, with a flow rate of 0.2 m / s used a temperature of 15, in this condition the temperature of the battery at discharge rate of 2c reached a discharge temperature of 37°C, which falls within the permissible range.

Keywords: Lithium-ion battery, discharging, design, cooling system, modeling, thermal-electric.

درصد کاهش می دهد [۵].

یافتن سیستم ذخیره انرژی مناسب یکی از ملزومات گسترش وسایل نقلیه ای است که با انرژی های پاک کار می کنند تا بتواند پیمایش مسافت زیاد و حرکت با شتاب بالا را برای خودرو تضمین کند. انواع باتری های از جمله باتری های سربی، باتری های نیکلی، باتری های سدیمی و باتری های لیتیومی در خودروهای الکتریکی استفاده شده است [۶]. باتری های لیتوم-یون در میان این باتری ها به دلیل چگالی انرژی بالا، عمر زیاد و نرخ خود دشارژ پایین برای خودروهای الکتریکی بهترین گزینه پیشنهاد شده است. امروزه باتری های لیتوم-یون علاوه بر خودروهای الکتریکی به طور گسترده ای در گوشی تلفن های هوشمند، لپ تاپ ها، ساعت های مچی و سایر وسایل الکترونیکی به کار می روند [۷].

۱- مقدمه

امروزه مردم در اقصی نقاط جهان در معرض خطرهای ناشی از بحران انرژی و آلودگی محیط زیست قرار دارند. پیشرفت هایی که در صنایع مختلف وجود دارد، حتی تقاضا برای منابع انرژی، مخصوصاً سوخت های فسیلی (نفت و گاز و غیره) با سرعت زیاد رو به افزایش نیز است. آمارهای سازمان جهانی میزان مصرف جهانی انرژی را معادل ۱/۹ میلیون بشکه نفت خام در هر روز گزارش داده اند [۱،۲]. رویکرد جهانی برای کاهش گازهای گلخانه ای و آلودگی هوا به سمت وسایل نقلیه با انرژی های پاک از جمله خودروهای الکتریکی و خودروهای هیبریدی معطوف شده است [۴،۳]. اندرسون و همکاران ایشان نشان دادند که استفاده از خودروهای الکتریکی میزان تولید گازهای گلخانه ای را تا ۴۰

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mirmohammadi.ali@gmail.com

با وجود برتری‌هایی که برای باتری‌های لیتیوم-یون ذکر شد، معایب این باتری‌ها مانع گسترش وسیع آن در خودروهای الکتریکی شده است. قیمت بالا، عمر محدود در دمای بالا، ایمنی پایین و خرابی‌های ناشی از دمای بالای دشارژ آنها از جمله مهمترین عیوب باتری‌های لیتیوم-یون هستند [۸]. اخیراً تلاش‌های زیادی برای انتخاب جنس مناسب برای الکترودهای این نوع باتری‌ها انجام شده است. مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون تأثیر بسیار زیادی بر روی کارایی، طول عمر و ایمنی این باتری‌ها دارد. محدوده مناسب دمای کارکرد باتری‌های لیتیوم-یون بین ۲۰- تا ۶۰ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است [۹]. محدوده دمای کارکرد بهینه باتری‌های لیتیوم-یون بین ۱۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس توسط پسران و همکاران پیشنهاد شده است [۱۰]. افزایش دما بیش از محدوده گفته شده باعث تخریب عمر و ظرفیت باتری می‌شود. متلج و همکاران نشان دادند، به ازای هر درجه افزایش دما بین ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس دو ماه از عمر باتری کاسته می‌شود [۱۱].

محمدیان و ژانگ [۱۲] طرح مخصوصی برای خنک‌کاری باتری لیتیوم یون با هوا با اضافه کردن پره به کانال‌های جریان هوا پیشنهاد دادند. با استفاده از این پره‌ها دمای بیشینه کمتر شد و توزیع دما نیز یکنواخت‌تر گردید. ایشان همچنین در تحقیقات دیگری با تعبیه کردن فوم‌های فلزی متخلخل درون کانال‌های جریان هوا توانستند عملکرد حرارتی باتری را بهبود ببخشند [۱۳، ۱۴].

شجاعی‌فرد و همکاران ایشان [۱۵]، رفتار باتری را در نرخ دشارژهای مختلف بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که هر چه نرخ دشارژ باتری بیشتر می‌شود دمای باتری افزایش بیشتری را نشان می‌دهد و پتانسیل الکتریکی سریع‌تر کاهش می‌یابد و باتری زودتر تخلیه می‌شود.

فن و همکاران [۱۶] تأثیر فاصله‌ی باتری‌ها در دسته باتری‌ها و تأثیر نرخ جریان ورودی در کارایی خنک‌کاری با روش جابه‌جایی اجباری با هوا را بررسی کردند. ایشان تأثیر فاصله‌ی غیر یکنواخت باتری‌ها در دسته باتری‌ها را نیز بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد، فاصله‌ی ۳ میلی‌متر بین باتری‌ها و جریان هوا با $40.8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ بهترین انتخاب در این روش خنک‌کاری است.

هیو و همکاران [۱۷] نوعی سیستم خنک‌کاری بر پایه‌ی صفحات سرمایش آلومینیومی را بررسی کردند. ایشان تأثیر تعداد کانال‌ها، جهت جریان در کانال‌ها، سرعت جریان ورودی در دمای محیط و نرخ دشارژ ۵c را بررسی کردند. مشخص شد که جهت جریان بهینه هنگامی است که جریان از سمت الکترودها به سمت سایر قسمت‌های باتری باشد. چون تولید گرما در تمام قسمت‌های باتری یکسان نبوده و تولید گرما در الکترودها بیشتر است. از این رو وقتی جریان بیشتری از قسمت‌هایی که الکترودها قرار دارند عبور می‌کند توزیع دمای یکنواخت‌تری به وجود می‌آید و اختلاف دما در نقاط مختلف باتری کم می‌شود. همچنین هر چه تعداد کانال‌ها بیشتر باشد توزیع دمای بهتری مشاهده می‌شود. بنابراین ایشان با توجه به نیاز انرژی نرخ جریان $5 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$ به عنوان مقدار بهینه پیشنهاد کردند.

رائو و همکاران [۱۸] کارایی سیستم‌های مدیریت حرارتی باتریهای لیتیوم-یون را با سرمایش به وسیله مینی کانال بررسی کردند. مدل آنها شامل یک دسته باتری است که از تعداد پنج باتری تشکیل می‌شود

و میان باتریها صفحه‌های سرمایش قرار دارد که در داخل کانالها، آب جریان دارد. نتایج ایشان نشان داد، با افزایش تعداد کانالها دمای بیشینه باتری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جریان دمای بیشینه کاهش می‌یابد ولی افزایش عرض کانال تأثیر چندانی روی دما ندارد. همچنین افزایش عرض کانال از ۳ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر باعث کاهش ۵۵ درصدی افت فشار می‌شود.

در تحقیق حاضر با مدل‌سازی حرارتی و الکتریکی باتری توزیع دما در هندسه‌ی باتری تعیین شده است تا در شرایطی که دمای باتری بیشتر از محدوده مجاز باشد با طراحی سیستم خنک‌کاری برای باتری دما در محدوده‌ی مجاز حفظ شود. سیستم‌های خنک‌کاری در باتری به سه نوع تقسیم می‌شوند:

سیستم‌های خنک‌کاری با هوا

سیستم‌های خنک‌کاری با مایع

سیستم‌های خنک‌کاری با مواد تغییر فاز دهنده

سیستم‌های خنک‌کاری تحت عنوان سیستم‌های فعال و غیر فعال نیز معرفی می‌شوند که سیستم‌های خنک‌کاری با مواد تغییر فاز دهنده جزء سیستم‌های غیر فعال محسوب می‌شوند. در این تحقیق با توجه به هزینه کمتر و ظرفیت مناسب خنک‌کنندگی آب از روش خنک‌کاری با مایع آب استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی باتری

بررسی رفتار حرارتی باتری ضروری است. چون کارایی و ایمنی باتری تحت تأثیر دمای باتری قرار دارد. در مقایسه‌ی روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های نظری، روش‌های آزمایشگاهی محدودیت‌های خاصی دارند. برای مثال یک آزمایش که برای یک شرایط محیطی خاص طراحی می‌شود برای اینکه در شرایط محیطی دیگر و شرایطی که پارامترهای باتری از جمله شدت جریان الکتریکی تغییر می‌کند جواب درستی بدهد، زمان زیادی باید صرف شود. همچنین با روش‌های آزمایشگاهی نمی‌توان دما در مرکز باتری را به طور دقیق بدست آورد و دما فقط در سطح باتری به دست می‌آید. در عوض شبیه‌سازی‌های عددی محدودیت‌های روش‌های آزمایشگاهی را ندارند و به راحتی می‌توان رفتار باتری در شرایط مختلف را بررسی کرد.

اولین قدم در شبیه‌سازی عددی باتری، مدل‌سازی حرارتی آن است. جمله چشمه در معادله‌ی انرژی باتری وابسته به شدت جریان و ولتاژ الکتریکی است. از این رو برای مشخص کردن ولتاژ و شدت جریان الکتریکی نیاز به مدل‌های الکتریکی نیز وجود دارد. ولتاژ و شدت جریان الکتریکی باتری را با استفاده از مدل‌های الکتروشیمیایی و مدل‌های مدار معادل الکتریکی می‌توان به دست آورد. چون معادلات انرژی و معادلات الکتریکی در باتری با یکدیگر کوپل هستند، برای به دست آوردن دما، ولتاژ و شدت جریان الکتریکی، معادلات کوپل باید به طور همزمان و با روش‌های عددی حل شوند.

شکل ۱ هندسه باتری لیتیوم-یون شبیه‌سازی شده در این مقاله را نشان می‌دهد. هندسه باتری در نرم افزار Gambit طراحی شد. عرض باتری ۱۶۹ میلی‌متر، طول ۱۷۹ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۴ میلی‌متر و ظرفیت باتری ۳۵ آمپر ساعت است. دما و ولتاژ باتری با حل معادلات الکتریکی و حرارتی محاسبه می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cT) + \nabla \cdot (\rho c \vec{v} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

در معادلات فوق ρ چگالی، t زمان، $\vec{v}$ سرعت و P فشار است. شرایط مرزی در حالت بدون خنک‌کاری عایق در نظر گرفته شده است و در حالت با خنک‌کاری در سطح تماس باتری و آب شرط مرزی interface و در ورودی جریان آب شرط مرزی سرعت، با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و در خروجی شرط مرزی فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

ولتاژ باتری با روش الکتروشیمیایی محاسبه می‌شود. در روش الکتروشیمیایی که بر اساس فیزیک درون باتری طراحی می‌شود، باید معادلات انتقال بار الکتریکی و انتقال جرم درون باتری حل شوند که این معادلات با به کار بردن قانون اهم در الکترودها و الکترولیت برای بار الکتریکی، قانون فیک در الکترودها و قانون محلول غلیظ در الکترولیت برای انتقال جرم به صورت زیر به دست می‌آیند [۲۱، ۲۰].

$$\nabla(\sigma^{\text{eff}} \nabla \phi_s) - j^{\text{li}} = 0 \quad (6)$$

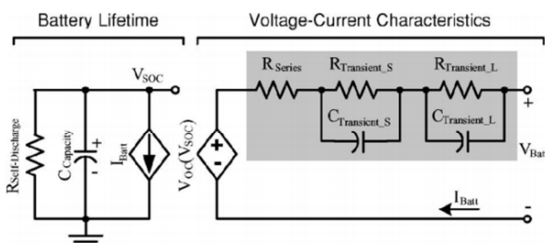
$$\nabla(\sigma^{\text{eff}} \nabla \phi_e) + \nabla(k_d^{\text{eff}} \nabla \ln c_e) + j^{\text{li}} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} - \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_s}{\partial r} \right) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\epsilon_e c_e) C_s}{\partial t} - \nabla(D_e^{\text{eff}} \nabla c_e) - \frac{1-t_+^0}{F} j^{\text{li}} + \frac{i_e v_{t+}}{F} = 0 \quad (9)$$

σ^{eff} رسانایی الکتریکی موثر در الکترود، ϕ_s پتانسیل الکتریکی در الکترود، j^{li} شدت جریان الکتریکی، ϕ_e پتانسیل الکتریکی در الکترولیت، k_d^{eff} رسانایی الکتریکی موثر در الکترولیت، c_e غلظت یون لیتیوم در الکترولیت، C_s غلظت یون لیتیوم در الکترود، D_s ضریب نفوذ جرم در الکترود، ϵ_e ضریب تخلخل، D_e^{eff} ضریب نفوذ جرم در الکترولیت، t_+^0 تعداد انتقال یون‌های لیتیوم و F ثابت فارادی هستند.

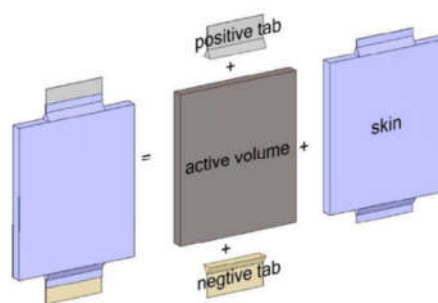
مدل‌سازی باتری در روش الکتریکی با تحلیل رفتار باتری در یک مدار و با استفاده از خازن‌ها و مقاومت‌ها انجام می‌شود. در این مقاله روش مدار معادل الکتریکی که توسط چن و همکاران [۲۲] پیشنهاد شده، استفاده شده است. در این روش با استفاده از یک مقاومت و دو جفت مقاومت-خازن پارامترهای الکتریکی باتری به دست می‌آیند. مدار معادل الکتریکی این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مدار معادل الکتریکی باتری لیتیوم-یون [۲۲]

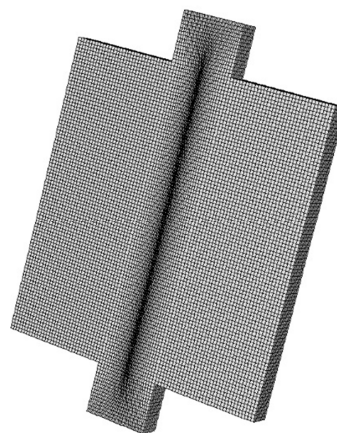
۴- حل عددی

روش حجم محدود برای محاسبه دما و ولتاژ باتری استفاده شده است. در این روش معادلات انرژی و معادلات الکتریکی از صورت



شکل ۱- هندسه باتری شبیه‌سازی شده

روش حجم محدود در نرم افزار Fluent برای حل عددی معادلات استفاده گردید. شبکه‌بندی هندسه‌ی باتری برای حل عددی در نرم افزار Gambit انجام گرفت. شکل ۲ هندسه باتری شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- باتری شبکه‌بندی شده در نرم افزار Gambit

۳- معادلات حاکم

معادله ۱ معادله‌ی انرژی حاکم در بدنه باتری است. جمله تولید گرما در داخل باتری در معادله‌ی انرژی به صورت معادله (۲) تابعی از ولتاژ و جریان باتری است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cT) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{gen}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{gen}} = I(E - V) - T \Delta S \frac{1}{nF} \quad (2)$$

رسانایی k تولید گرما، ρ چگالی، Q_{gen} در معادلات فوق V ولتاژ مدار باز، E شدت جریان الکتریکی، I گرمای ویژه، C گرمایی، ثابت فارادی F تعداد الکترون‌ها و n آنتروپی، ΔS دما، T ولتاژ مدار بسته، از دو بخش تشکیل شده است: تولید گرمای ناشی Q_{gen} هستند. جمله عبور جریان از الکترودها و الکترولیت حاصل می‌شود [۱۹].

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای حل جریان آب در سیستم خنک‌کاری باید حل شوند تا توزیع دما در باتری به دست آید. این معادلات به صورت کوپل با یکدیگر حل می‌شوند. معادلات (۳) تا (۵) به ترتیب معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند.

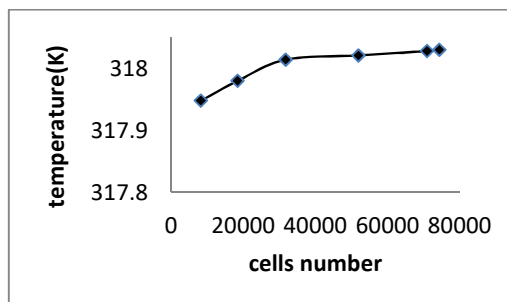
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

مشتقات جزئی گسسته‌سازی شده و در سلول‌های محاسباتی ایجاد شده در هندسه‌ی باتری حل می‌شوند. ابتدا با مقادیر پارامترهای الکتریکی که به وسیله چن و همکاران به دست آمده است تغییرات ولتاژ با زمان مشخص گردید، سپس معادله انرژی با توجه به ولتاژ به دست آمده، در نرم افزار Fluent حل شد و دمای گذرای باتری به دست آمد. ملاحظه گردید، در حل گذرای باتری دمای بدنه آن بالاتر از محدوده کاربرد بهیته رسیده است. لذا لازم شد که بخش خنک‌کاری به باتری اضافه شود. در این مرحله معادلات پیوستگی و مومنتوم سیال خنک کننده حل شدند. برای حل این معادلات از روش حجم محدود برای گسسته سازی و روش Simple برای حل معادلات گسسته شده در نرم افزار Fluent استفاده شده است. گام زمانی ۱ ثانیه برای حل گذرای معادلات استفاده شد. شرط مرزی ورود جریان آب، سرعت ورودی و شرط مرزی خروج جریان و فشار خروجی در نظر گرفته شد.

۵- استقلال نتایج حل از تعداد سلولهای محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی یک روش حل عددی معادلات دیفرانسیل است که با شبکه‌بندی هندسه‌ی مورد نظر مجهولات مساله در مرکز سلول‌ها را محاسبه می‌کند. اندازه سلول‌های محاسباتی در جاهایی که گرادیان زیاد است باید با توجه به ابعاد مساله به اندازه‌ی کافی ریز باشد تا جواب‌های درستی به دست آید. شکل ۴ دمای متوسط باتری پس از تخلیه کامل در نرخ دشارژ ۱c با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، بعد از تعداد سلول ۳۰۰۰۰ اختلاف اندکی در نتایج وجود دارد. تعداد سلول‌های محاسباتی ۷۰۰۰۰ سلول در حل عددی این مقاله استفاده گردید.

منظور از نرخ دشارژ ۱c در این مقاله به معنی این است که شدت جریانی از باتری گرفته شود تا باتری در مدت ۱ ساعت تخلیه شود و در نرخ دشارژ ۲c شدت جریان الکتریکی دو برابر می‌شود و باتری در مدت نیم ساعت تخلیه می‌شود.

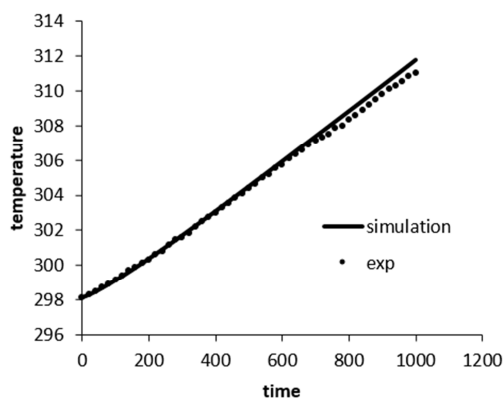


شکل ۴- دمای متوسط باتری پس از تخلیه کامل در نرخ دشارژ ۱c با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف

۶- اعتبار سنجی

مسائلی که با روش‌های عددی حل می‌شوند بدون مقایسه با نتایج تجربی و آزمایشگاهی معتبر نیستند. عوامل مختلفی از قبیل اندازه سلول محاسباتی و فیزیک جریان ممکن است منجر به خطا در حل عددی شود. در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی باتری با نتایج مرجع [۲۳] اعتبارسنجی شده است. شکل ۵ نتایج حاصل از حل عددی را در

مقایسه با نتایج تجربی در نرخ دشارژ ۳C نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارند و این نشان می‌دهد که مدل‌سازی انجام شده دقت خوبی داشته و می‌تواند دمای باتری را به خوبی پیش‌بینی کند.

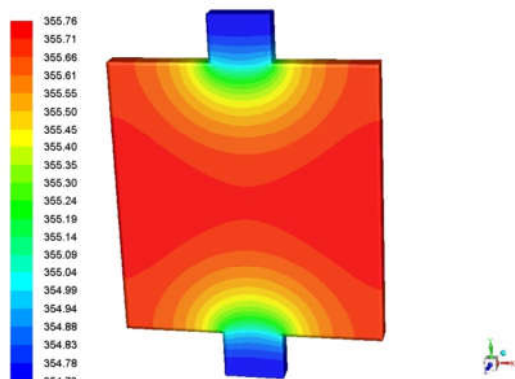


شکل ۵- نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳]

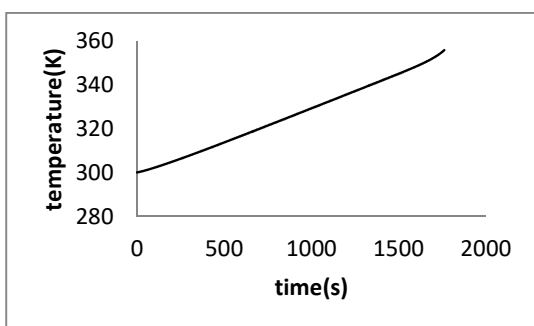
۷- تحلیل نتایج

عبور جریان الکتریکی باعث تولید انرژی گرمایی در داخل باتری می‌شود و هر چه نرخ جریان الکتریکی بیش‌تر باشد حرارت تولید شده بیش‌تر می‌شود و دمای باتری بالاتر می‌رود. شکل ۶ کانتور دمای باتری، شکل ۷ تغییرات دمای متوسط و شکل ۸ تغییرات ولتاژ باتری را در نرخ دشارژ ۱c در مدت ۳۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهند. ابتدا باتری در دمای ۳۰۰ کلوین یا ۲۷ درجه سلسیوس قرار دارد. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد پس از تخلیه کامل باتری، دمای بیشینه باطری به ۳۲۷ کلوین، معادل ۵۴ درجه سلسیوس می‌رسد که نشان دهنده‌ی ۲۷ درجه افزایش دما در حین دشارژ شدن باتری است. افزایش دما در شکل ۷ بعد از ۳۶۰۰ ثانیه متوقف می‌شود. دلیل این امر این است که بعد از ۳۶۰۰ ثانیه باتری تخلیه می‌شود و هیچ یون لیتیومی در داخل الکترود منفی وجود ندارد که با انتقال آن در داخل باتری گرما تولید شود. شکل ۸ تغییرات ولتاژ باتری با زمان را نشان می‌دهد. ولتاژ باتری از ۳/۸۵ ولت در آغاز دشارژ به ۲/۶ ولت در پایان دشارژ می‌رسد. شکل نشان می‌دهد که شیب تغییرات ولتاژ در ابتدا و انتهای دشارژ بسیار زیاد و در سایر زمان‌ها شیب تغییرات ملایم است. این تغییرات ناگهانی ولتاژ مربوط به مقاومت درونی باتری است که به دلیل عبور جریان از داخل الکترودها و الکترولیت و همچنین تغییرات غلظت یون لیتیوم ایجاد می‌شود.

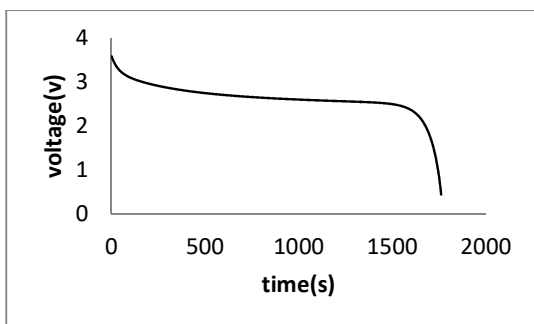
با یکی از روش‌های خنک‌کاری، دمای باتری پایین آورده شود تا آسیبی به باتری نرسد.



شکل ۹- کانتور دمای باتری بعد از دشارژ باتری به مدت ۱۸۰۰ ثانیه



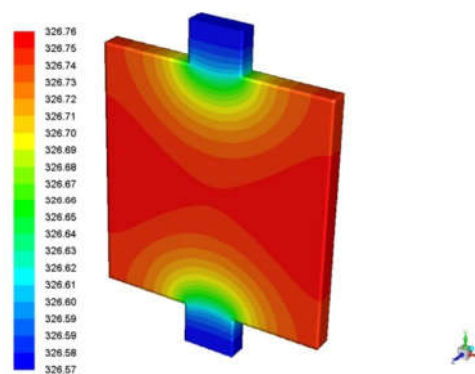
شکل ۱۰- تغییرات دمای متوسط باتری با زمان در نرخ دشارژ ۲c



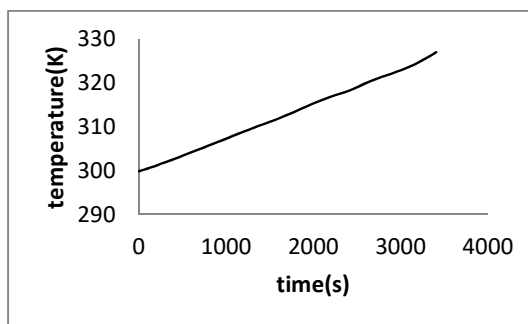
شکل ۱۱- تغییرات ولتاژ باتری با زمان در نرخ دشارژ ۲c

۸- خنک‌کاری باتری

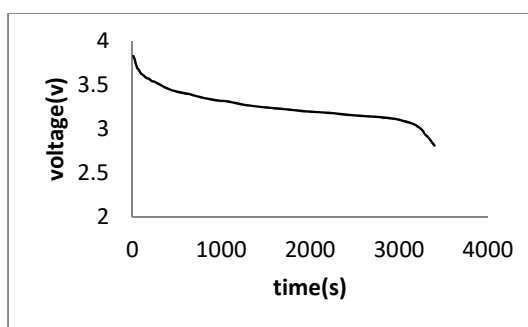
بخش خنک‌کاری باتری به صورت شکل ۱۲ طراحی گردید.



شکل ۶- کانتور دمای باتری بعد از دشارژ باتری به مدت ۳۶۰۰ ثانیه

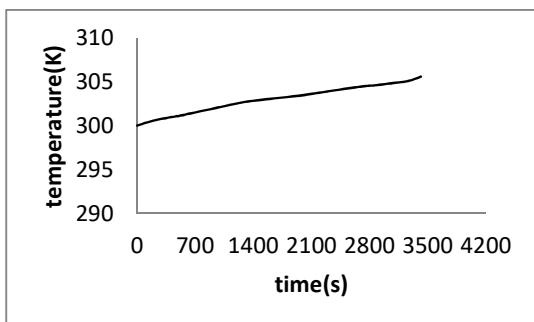


شکل ۷- تغییرات دمای متوسط باتری با زمان در نرخ دشارژ ۱c



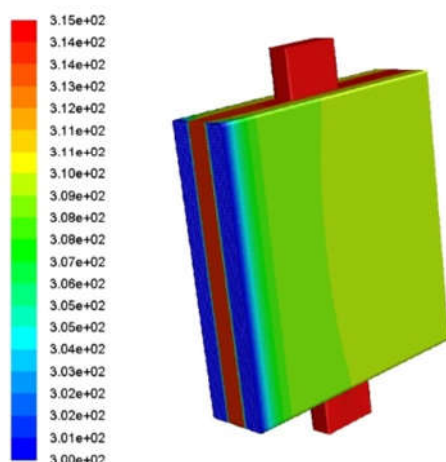
شکل ۸- تغییرات ولتاژ باتری با زمان در نرخ دشارژ ۱c

شکل ۹ کانتور دمای باتری، شکل ۱۰ تغییرات دمای متوسط و شکل ۱۱ تغییرات ولتاژ باتری را در نرخ دشارژ ۲c بعد از گذشت ۳۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهند. ابتدا باتری در دمای ۳۰۰ کلوین یا ۲۷ درجه سلسیوس قرار دارد. همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد پس از تخلیه کامل باتری، دمای بیشینه باتری به ۳۵۶ درجه کلوین، معادل ۸۳ درجه سلسیوس می‌رسد که نشان دهنده ۵۶ درجه افزایش دما در حین دشارژ شدن باتری است. وقتی نرخ دشارژ باتری به ۲c افزایش می‌یابد، به دلیل افزایش جریان باتری زودتر تخلیه می‌شود و ولتاژ سریع‌تر کاهش می‌یابد و دمای باتری بیش‌تر افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که از ابتدا تا انتهای فرایند دشارژ باتری، دما ۵۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. برای کارکرد بهینه باتری‌های لیتیوم-یون محدودی دمای مناسب بین ۱۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس توسط پسران و همکاران پیشنهاد شده است [۱۰]. لذا برای کاهش دمای باتری باید

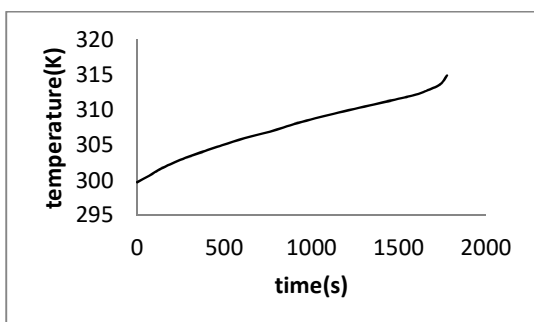


شکل ۱۴- تغییرات دمای متوسط باتری در نرخ دشارژ ۱c و جریان آب با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و دمای ۲۵ درجه سلسیوس

شکل ۱۵ کانتور دما و شکل ۱۶ تغییرات دمای متوسط باتری بر حسب زمان را در نرخ دشارژ ۲c با جریان آب با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که دمای بیشینه باتری از ۸۳ درجه سلسیوس در شرایط بدون خنک‌کاری به ۴۰ درجه سلسیوس با خنک‌کاری کاهش می‌یابد.



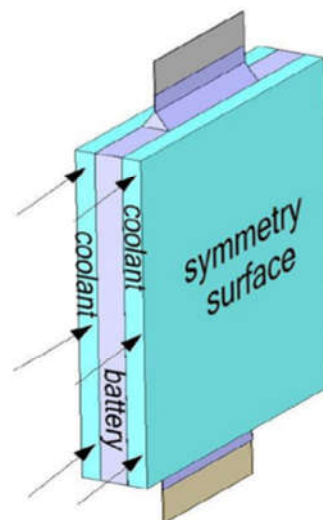
شکل ۱۵- کانتور دمای باتری بعد از خنک‌کاری به مدت ۱۸۰۰ ثانیه در نرخ دشارژ ۲c



شکل ۱۶- تغییرات دمای متوسط باتری در نرخ دشارژ ۲c و جریان آب با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و دمای ۲۵ درجه سلسیوس

۸-۲- خنک‌کاری با آب ۱۵ درجه سلسیوس

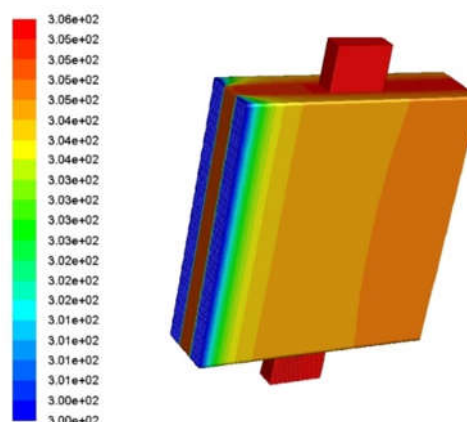
برای خنک‌کاری بیش‌تر، دمای آب ورودی تا ۱۵ درجه سلسیوس



شکل ۱۲- طرح هندسی خنک‌کاری باتری

۸-۱- خنک‌کاری با آب ۲۵ درجه سلسیوس

شکل ۱۳ کانتور دمای باتری را در خنک‌کاری با جریان آب ۲۵ درجه سلسیوس با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. نحوه‌ی تغییر دمای متوسط باتری در کل هندسه‌ی باتری بعد از گذشت ۳۶۰۰ ثانیه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این شرایط خنک‌کاری باعث کاهش دمای بیشینه باتری در نرخ دشارژ ۱c از ۵۴ به ۳۱ درجه سلسیوس می‌شود. به دلیل عبور جریان آب دمای باتری فقط ۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد در حالی که در قسمت قبل که قسمت خنک‌کاری اضافه نشده بود دمای باتری ۲۷ درجه سلسیوس افزایش پیدا می‌کرد. عبور جریان آب از طریق انتقال گرمای رسانی و انتقال گرمای جابجایی باعث کاهش دمای آب می‌شود. همان طور که در شکل ۱۴ مشخص شده است دمای آب در ابتدای ورود با دمای محیط برابر است و هر چه بیشتر در طول باتری جریان می‌یابد گرمای بیشتری جذب خود می‌کند و هنگام خروج بیش‌ترین دما را دارد که تنها ۱ درجه از دمای باتری کمتر می‌باشد.



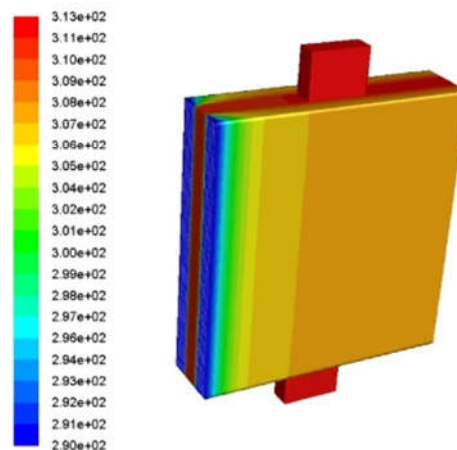
شکل ۱۳- کانتور دمای باتری بعد از خنک‌کاری به مدت ۳۶۰۰ ثانیه در نرخ دشارژ ۱c

طراحی یک بخش خنک‌کاری برای باتری، عملکرد باتری با عبور جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه و دمای 25 و 15 درجه سلسیوس بررسی شد. با عبور جریان آب معادلات پیوستگی و مومنوم علاوه بر معادلات انرژی و معادلات الکتریکی حل شدند و نتایج نشان دادند که عبور جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه و دمای 25 درجه سلسیوس، از طریق انتقال گرمای جابجایی و انتقال گرمای رانشی خنک‌کاری باعث کاهش دمای بیشینه باتری در نرخ دشارژ $1c$ از 54 به 31 درجه سلسیوس و در نرخ دشارژ $2c$ از 83 به 40 درجه سلسیوس می‌شود. همچنین عبور جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه و دمای 15 درجه سلسیوس، از طریق انتقال گرمای جابجایی و انتقال گرمای رانشی خنک‌کاری باعث کاهش دمای بیشینه باتری در نرخ دشارژ $2c$ از 37 درجه سلسیوس می‌شود. بنابراین با این روش‌های خنک‌کاری دمای باتری در محدوده عملکردی مجاز قرار می‌گیرد.

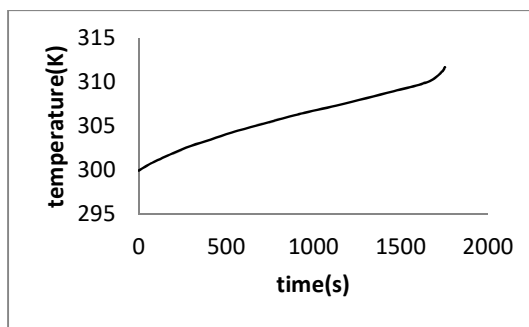
۱۰- مراجع

- [1] British Petroleum, BP statistical review of world Energy, 2016.
- [2] British Petroleum, BP Energy Outlook, 2016.
- [3] Mirmohammadi A., Rashtbarzadeh A., Bus vehicle hybridisation and its impacts on driving cycle fuel consumption, International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, Vol: 6, No: 1, pp:14-30, 2014.
- [4] Mirmohammadi A., Tavakkoli Z., An internal Combustion Engine Car powertrain Performance, in Comparison with Full Hybrid with Series Structure and Mild Hybrid with Parallel Structure, Journal of Mechanical Engineering (Tabriz University): Vol: 46, No: 3, pp: 203-212, 2016. (In Persian).
- [5] Andersen P.H., Mathews J.A., Rask M., Integrating private transport into renewable energy policy: the strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles, Energy Policy, Vol: 37, No: 7, pp: 2481-2486, 2009.
- [6] Budde-Meiwes H, Drillkens J, Lunz B, Muennix J, Rothgang S, Kowal J, et al., A review of current automotive battery technology and future prospects, Journal of Automobile Engineering, Vol: 227, No: 5, pp: 761-776, 2013.
- [7] Warner J., Introduction Hand book lithium-ion battery pack design, Elsevier, pp: 1-8, 2015.
- [8] Conte FV., Battery and battery management for hybrid electric vehicles, a review. E I Elektrotechnik and Informations technik, 123:424-31, 2006.
- [9] Väyrynen A, Salminen J., Lithium ion battery production, J ChemThermodyn, 46:80-5, 2012.
- [10] Pesaran A., Santhanagopalan G.K., Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications, 30th international battery seminar; 2013.
- [11] Motloch C.G., Christophersen J.P., Belt J.R., Wright R.B., Hunt G.L., Sutula R.A., et al., High-power battery testing procedures and analytical methodologies for HEV's, Future Car Congress, pp:1-7, 2002.
- [12] Mohammadian SK, Zhang Y., Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles, J Power Sources, 273:431-9, 2015.
- [13] Mohammadian SK, Rassoulinejad-Mousavi SM, Zhang Y., Thermal management improvement of an air-cooled high-power lithium-ion battery by embedding metal foam, J Power Sources, 296:305-13, 2015.
- [14] Mohammadian S.K., Zhang Y., Cumulative effects of using pin fin heat sink and porous metal foam on thermal management of lithium-ion batteries, ApplTherm Eng, 118:375-84, 2017.
- [15] Salami Ranjbaran, Y., Shoaeeefard M.H., Molaeimanesh G.R., Thermal behavior of a commercial

کاهش داده شد. شکل ۱۷ کانتور دما و شکل ۱۸ تغییرات دمای متوسط باتری برحسب زمان را در نرخ دشارژ $2c$ با جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که دمای متوسط باطری در این حالت بعد از تخلیه کامل در نرخ دشارژ $2c$ به 37 درجه سلسیوس می‌رسد که یک دمای ایده‌آل برای باتری است و باعث عملکرد مطلوب باتری می‌شود. دلیل عملکرد مطلوب باتری در دمای پایین‌تر این است که هر چه دما بالاتر برود مقاومت در برابر انتقال یون‌های لیتیوم در داخل باتری بیش‌تر می‌شود و همین امر باعث کم شدن کارایی باتری می‌شود.



شکل ۱۷- کانتور دما در نرخ دشارژ $2c$ و جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه و دمای 15 درجه سلسیوس



شکل ۱۸- تغییرات دمای متوسط باتری در نرخ دشارژ $2c$ و جریان آب با سرعت 0.2 متر بر ثانیه و دمای 15 درجه سلسیوس

۹- نتیجه گیری

دمای بیشینه باتری حین تخلیه‌ی جریان نباید از محدوده مجاز تجاوز کند، در غیر اینصورت طول عمر باتری کاهش و عملکرد آن خراب می‌شود. در این مقاله معادلات انرژی و معادلات الکتریکی به صورت کوپل با یکدیگر حل شدند و دمای باتری برای شرایط مختلف به صورت عددی محاسبه گردید. نتایج نشان دادند وقتی باتری با نرخ دشارژ $1c$ تخلیه می‌شود دمای بیشینه باتری به 54 درجه سلسیوس و در نرخ دشارژ $2c$ به 83 درجه سلسیوس می‌رسد که این دما باعث کاهش عملکرد مطلوب باتری و آسیب دائمی باتری می‌شود. از این رو با

- prismatic Lithium-ion battery cell applied in electric vehicles, *International Journal of Automotive Engineering (IJAE)*, 8(2): 2700-2708, 2018.
- [16] Fan L., Khodadadi J.M., Pesaran A.A., A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles, *J Power Sources*, 238:301–12, 2013.
- [17] Huo Y., Rao Z., Liu X., Zhao J., Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate, *Energy Converts Management*, 89:387–95, 2015.
- [18] Qian Zh., Li Y., Rao Z., Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling, *Energy Conversion and Management Elsevier* 126, 622–631, 2016.
- [19] Karimi G., Li X., Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles, *International Journal of Energy Research*, 37:13–24, 2013.
- [20] Li G., Li S., Physics-based CFD simulation of lithium-ion battery under the FUDS driving cycle, *ECS Trans.* 64 (33) 1–14, 2015.
- [21] Yang N., Zhang X., Li G., Hua D., Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements, *Applied Thermal Engineering*, 2015.
- [22] Chen M., Rincon-Mora G.A., Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, June 2006.
- [23] Chen D., Jiang J., Kim G.H., Yang Ch., Pesaran A., Comparison of Different Cooling Methods for Lithium Ion Battery Cells, *Applied thermal engineering* 94846-854, 2016.