

طراحی و تحلیل سامانه مدیریت گرمایی ماژول باتری خودرویی لیتیوم-یون با استفاده از میکروکانال در نرخ‌های مختلف تخلیه

محمد پارسا دولت‌یار
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
m_dolatyar@auto.iust.ac.ir

علی قاسمیان‌مقدم*
استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
qasemian@iust.ac.ir

مهدی اکبرشاهی
کارخانه نوآوری آمپر، تهران، ایران،
m.akbarshahi@riseco.co

عطیه طلایی
کارخانه نوآوری آمپر، تهران، ایران،
talaei.a1998@gmail.com

امیررضا فتحی
کارخانه نوآوری آمپر، تهران، ایران،
a.fathi@amperinnovation.com

چکیده

حفظ دمای باتری لیتیوم-یون در محدوده‌ی عملکردی و توزیع یکنواخت دما تأثیر بسزایی در ایمنی و عملکرد آن دارد. در این پژوهش، عملکرد سیستم مدیریت گرمایی بسته باتری در مقیاس خودرویی شامل ۳۸۵ باتری لیتیوم یون ۲۱۷۰۰، طی نرخ جریان‌های ۱C، ۲C و ۳C و فرآیند پیش‌گرمایش به صورت عددی بررسی شده است. سامانه مدیریت گرمایی به کار گرفته شده در این پژوهش از نوع میکروکانال‌های موج‌دار آلومینیومی است و در دو الگو میکروکانال پایه و بهبود یافته با تمرکز بر زاویه تماس باتری و میکروکانال و تعداد اتصالات U شکل مورد بررسی قرار گرفت. در نرخ جریان‌های بالاتر از ۱C با فرض حداکثر سرعت ورودی میکروکانال ۱/۴۱ متر بر ثانیه (به منظور حفظ رژیم جریان لایه‌ای)، سیستم خنک‌کاری توانایی حفظ شرایط دمایی به صورت پایا را ندارد. تحت این شرایط سیستم خنک‌کاری توانایی حفظ شرایط دمایی برای ۲۵۷ ثانیه برای نرخ جریان ۲C و ۸۶ ثانیه برای نرخ جریان ۳C را دارد. فرآیند پیش‌گرمایش با دمای اولیه ۲۰- درجه سلسیوس نیز طی ۸۸۵ ثانیه محقق شد. همچنین استفاده از طرح بهبودیافته راندمان گرمایی را تا میزان ۳۹/۳٪ افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت گرمایی، خودروی برقی، بسته باتری لیتیوم-یون ۲۱۷۰۰، میکروکانال، راندمان حرارتی، پیش گرمایش.

Design and analysis of thermal management system of lithium-ion automotive battery module using microchannel in different discharge rates

M. P. Dolatyar
A Qasemian
M. Akbarshahi
A. Talaei
A. R. Fathi

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
AMPER Innovation Factory, Tehran, Iran
AMPER Innovation Factory, Tehran, Iran
AMPER Innovation Factory, Tehran, Iran

Abstract

As new powertrains are extended, the usage of lithium-ion batteries in the automotive industry is increasing. Maintaining the temperature within the functional range of uniform temperature distribution has a significant impact on the safety and performance of the lithium-ion battery. Simulation of the thermal performance of a battery cell or a limited set of battery cells, although it can help advance the goals of the battery thermal management system designers, but in the end, to achieve the main goals of the battery thermal management system in the car, it is important to be able to have a battery pack or module in Simulated real scale with automotive application. In this research, the performance of the thermal management system of the battery pack including 385 cells of 21700 lithium-ion batteries, during the flow rates of 1C, 2C and 3C and the pre-heating process has been investigated with the help of computational fluid dynamics tools. This research utilizes an aluminum waved microchannel thermal management system. The cooling fluid passing through these microchannels is made up of water and ethylene glycol. Two microchannel patterns were analyzed. In the improved model, the shortcomings of the elementary design have been addressed. The contact angle of the battery and the microchannel was set to 60 degrees in order to increase the energy density of the battery module and prevent the creation of a high temperature gradient for all cells. To decrease the pressure drop, the number of U-shaped connections was reduced. At the flow rate of 1C, the temperature conditions are achieved with a fluid velocity of 0.1 m/s, but at higher flow rates due to the inability of the cooling system to maintain the temperature conditions stably, assuming the maximum inlet velocity of the microchannel is 1.41 m/s (in order to maintain slow flow regime), the cooling system is capable of maintaining temperature conditions for 257 seconds at 2C flow rate and 86 seconds at 3C flow rate. Preheating process with an initial temperature of -20°C was also achieved within 885s. Also, the use of the improved design increased the thermal efficiency by 39.3%.

Keywords: Thermal management, 21700 lithium-ion battery, Computational fluid dynamics, Microchannel, Preheating.

۱- مقدمه

فسیلی، توسعه بهره‌گیری از منابع انرژی جایگزین و تجدیدپذیر غیر قابل اجتناب است. دولت‌های سراسر دنیا به منظور توسعه به کارگیری سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی با چگالی انرژی بالا در وسایل

به دلیل آثار نامطلوب زیست محیطی استفاده از سوخت‌های

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۱۴

نقلیه، به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان اصلی سوخت فسیلی، از برنامه‌های تشویقی کمک می‌گیرند [۱]. در حال حاضر، امیدوارکننده‌ترین سیستم ذخیره‌سازی انرژی برق باتری‌های لیتیوم یونی هستند که چگالی انرژی بیشتری نسبت به باتری‌های موجود در بازار را دارند. از آنجایی که ولتاژ و جریان یک تک سلول لیتیوم یونی برای بسیاری از کاربردها مانند خودروهای الکتریکی بسیار اندک بوده و نیاز مصرف‌کنندگان را مرتفع نمی‌کند، تعداد زیادی باتری به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل می‌شوند تا در قالب یک ماژول باتری، ولتاژ و جریان مورد نیاز برای سیستم‌هایی مانند وسایل نقلیه الکتریکی، شبکه ثابت و سیستم‌های ذخیره انرژی تجدیدپذیر را بوجود آورند. برای ماژول‌های باتری لیتیوم یونی، ایمنی و عمر ماژول دو پارامتر مهم طراحی هستند. یکی از متغیرهای اصلی که می‌تواند بر ایمنی و عمر ماژول باتری تأثیر بگذارد دما است. باتری‌های لیتیوم یونی به دلیل مکانیزم‌های الکتروشیمیایی در طی عملکرد عادی خود گرما تولید می‌کنند [۲]. اگر گرمای تولید شده به طور موثر از باتری خارج نشود، انباشته شده و باعث افزایش دمای باتری می‌شود [۳]. با افزایش دمای عملیاتی، میزان تخریب در اکثر اجزای باتری به ویژه الکترولیت، چسباننده الکترودها و مواد فعال الکترود افزایش می‌یابد که منجر به کاهش طول عمر باتری، کاهش بازده انرژی و ایمنی کمتر [۴] می‌شود. پدیده فرار گرمایی یکی دیگر از دلایل نگرانی در باتری‌ها از لحاظ ایمنی است. فرار گرمایی یک پدیده سریع است که در باتری‌های لیتیوم یونی در دماهای بالا رخ می‌دهد. شروع مجموعه‌ای از واکنش‌های جانبی گرمازا که باعث افزایش ناگهانی درجه گرما درونی تا ۸۷۰ درجه سلسیوس در مدت زمان کوتاه می‌شود [۵]. دمای بهینه عملکرد باتری‌های لیتیوم-یون برای دستیابی به حداکثر عمر و ایمنی ۲۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس گزارش شده است [۶]. با این حال، دمای نزدیک به ۲۵ درجه سلسیوس معمولاً برای باتری لیتیوم یونی ترجیح داده می‌شود. میزان مجاز حداکثر گردایان دمای باتری‌های لیتیوم-یون در ماژول، کمتر از ۵ کلین گزارش شده است [۷].

برای عملکرد ایمن ماژول باتری، معمولاً یک سیستم مدیریت گرمایی باتری توسط مهندسان طراحی می‌شود. مطالعات متعددی بر اساس سامانه‌های هواخنک، مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، لوله‌های گرمایی و ترموالکتریک در مقالات گزارش شده است. از بین این روش‌ها، خنک‌کننده مایع فعال بیشتر ترجیح داده شده و به دلیل کارایی بالا در فرآیند انتقال گرما، برای نرخ‌های تخلیه جریان بالاتر، تجاری‌سازی شده است [۷].

باسو و همکاران [۸]، به مدل‌سازی یک سیستم مدیریت گرمایی مایع خنک برای ماژول باتری ۱۸۶۰ پرداختند. این سیستم بدون به خطر انداختن امنیت باتری به صورت فشرده و اقتصادی طراحی شده است. این مدل برای ارزیابی اثرات سرعت جریان مایع خنک‌کننده و جریان تخلیه در دمای ماژول باتری استفاده شده است. مقاومت تماسی تأثیر زیادی بر عملکرد گرمایی دارد.

میرمحمدی و همکاران [۹]، به کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به بررسی اثر خنک‌کاری در باتری لیتیوم-یون پرداختند. نتایج نشان از حفظ دمای باتری در محدوده عملکردی به کمک سامانه خنک‌کاری آب‌خنک دارد.

رحمانیان و همکار [۱۰]، به بررسی عملکرد باتری لیتیوم-یون

منشوری به کمک مواد تغییر فاز دهنده هیبرید پرداختند. بر مبنای CFD از روش NTGK برای شبیه‌سازی باتری استفاده کردند. نتایج نشان از بهبود ۴۵ درصدی عملکرد گرمایی ماده تغییر فاز دهنده به کمک فوم فلز می‌دهند.

ژی و همکاران [۱۱]، به مدل‌سازی سیستم مدیریت گرمایی مایع خنک برای ماژول باتری NCM پرداختند. روشی برای افزایش ضریب انتقال گرما با افزودن بافل در میکروکانال‌ها پیشنهاد شده است. با افزایش ارتفاع و تعداد بافل‌ها انتقال گرمای بسته باتری افزایش یافته اما افت فشار برای انتقال جریان مایع خنک‌کننده نیز افزایش یافته است.

طوسی و همکاران [۱۲]، به مطالعه عددی سیستم مدیریت گرمایی باتری جدید برای باتری‌های ۱۸۶۵۰ و ۲۱۷۰۰ در نرخ تخلیه بالا بر اساس نانوسیال AgO و غلاف مس پرداختند. تأثیرات دبی، نرخ تخلیه، کسر حجمی نانوسیال و سرعت جریان بر روی بازده گرمایی ماژول باتری در نرخ‌های تخلیه بالا (۳۵، ۵۰ و ۷۰) تجزیه و تحلیل شده‌اند. واحدی در مطالعه باتری است که برای اندازه‌گیری سرعت شارژ کامل یا دشارژ کامل به کار می‌رود^۱. مقایسه دقیق بین ماژول‌های باتری ۱۸۶۵۰ و ۲۱۷۰۰ به طور جامع انجام شده است. نتایج نشان داد که حداکثر دما و اختلاف دما با افزایش سرعت ورودی و کسر حجمی نانوسیال کاهش بسیاری یافته است. هنگامی که سیستم مایع خنک تحت نرخ تخلیه ۷۰ در سرعت جریان بهینه و کسر حجمی نانوسیال به عنوان خنک‌کننده قرار گرفته است، حداکثر دما و اختلاف دما ماژول باتری به ترتیب زیر ۳۰۵/۵۹ و ۱/۰۷ کلین نگه داشته شده است. با مقایسه سیستم‌های مدیریت گرمایی باتری لیتیوم یون نوع ۱۸۶۵۰ و ۲۱۷۰۰ دریافتند که نوع ۲۱۷۰۰ آینده امیدوارکننده‌ای خواهد داشت. لی و همکاران [۱۳]، به بررسی هندسه مناسب برای میکروکانال‌های خنک‌کننده باتری‌های لیتیوم-یون پرداختند. نتیجه نشان داد بهره‌گیری از هندسه بهبود یافته سبب کاهش ۲۴/۱۸٪ افت فشار در میکروکانال U شکل می‌گردد. تانگ و همکاران [۱۴] شبیه‌سازی‌های گذرا سه‌بعدی (3D) بر روی ماژول باتری انجام دادند. افزایش زاویه تماس موجی و سرعت جریان جرمی بر راندمان اتلاف گرما و همگنی میدان دمایی ماژول باتری تأثیر مثبت دارد. با این حال پس از رسیدن مقادیر زاویه تماس و دبی جرمی، به مقادیر حدی، آثار مثبت آن‌ها کاهش می‌یابد.

برای تقویت انتقال حرارت در میکروکانال‌ها، فرهنگ‌مهر [۱۵] با حل عددی نشان دادند که افزودن ریب آشوب‌ساز—به‌همراه استفاده از نانوسیال—رفتار هیدرودینامیکی و شار حرارتی را به‌صورت تابعی از ارتفاع/طول ریب، عدد رینولدز و کسر حجمی ذرات دگرگون می‌کند؛ نتایج راستی‌آزمایی‌شده آنان مبنای مفیدی برای طراحی میکروسیستم‌های حرارتی است. برای تقویت غیرفعال انتقال حرارت در کانال‌های باریک، استفاده از مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر امیدبخش است؛ آهنگر و همکاران [۱۶] با حل عددی برهم‌کنش سازه-سیال در

^۱ به‌عنوان مثال اگر ظرفیت یک باتری ۱۰۰ آمپر ساعت باشد، باتری ۱C، جریانی به میزان ۱۰۰ آمپر را در یک ساعت به‌طور مداوم می‌دهد. یا برای همین ظرفیت، باتری ۲C، در نیم ساعت ۲۰۰ آمپر را به‌طور مداوم می‌دهد.

میکروکانال در جهت افزایش چگالی انرژی مازول باتری و نیز جلوگیری از ایجاد گرادیان دمایی بالا برای تمامی سلول‌ها برابر مقدار ۶۰ درجه تنظیم شد. همچنین جهت کاهش افت فشار، تعداد اتصالات U شکل کاهش داده شده و در نهایت راندمان سامانه خنک‌کاری در دو طرح ارائه شده اولیه و بهبودیافته مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

فعالیت اصلی در این مطالعه بر روی سیال خنک‌کننده باتری و تولید گرمای ناشی از عملیات تغذیه و تخلیه است. بنابراین لازم است در ابتدا با توجه به تراکم ناپذیر بودن سیال خنک‌کننده مورد استفاده، معادله‌ی بقای جرم را در دستگاه مختصات دکارتی در سه بعد به فرم رابطه (۱) نوشته می‌شود [۲۰].

$$\nabla \cdot V_c = 0 \quad (1)$$

معادله‌ی بقای مومنتوم برای سیال خنک‌کننده در رابطه (۲) آمده است [۲۰].

$$\rho_c \frac{\partial V_c}{\partial t} + (V_c \cdot \nabla) V_c = -\nabla P + \mu_c \nabla^2 V_c \quad (2)$$

در معادلات بالا اندیس c نمایانگر سیال خنک‌کننده است. همچنین V_c بردار سرعت سیال خنک‌کننده، ρ_c چگالی سیال است. معادله‌ی بقای انرژی برای سیال خنک‌کننده در مختصات دکارتی به صورت رابطه (۳) است [۲۰].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V_c \cdot \nabla) T = \frac{K_c}{\rho_c C_{p_c}} \nabla^2 T \quad (3)$$

معادله‌ی بقای انرژی برای میکروکانال به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{mc} C_{p_{mc}} T) = \nabla \cdot (K_{mc} \nabla T) \quad (4)$$

K_c رسانایی گرمایی سیال، K_{mc} رسانایی گرمایی میکروکانال است. معادله‌ی بقای انرژی برای سلول باتری به صورت رابطه (۵) است [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b C_{p_b} T) = \nabla \cdot (K_b \nabla T) + \dot{Q} \quad (5)$$

در رابطه‌ی بالا $\dot{Q}$ بیانگر چشمة گرمایی است و از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\dot{Q} = \frac{Q_{gen}}{V_b} \quad (6)$$

که Q_{gen} و V_b به ترتیب نرخ تولید گرما باتری و حجم باتری لیتیوم یونی هستند. نرخ تولید گرما برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر باعث افزایش دمای باتری در طول فرآیند تخلیه می‌شود. بخش اول گرمای برگشت‌پذیر ناشی از واکنش الکتروکاتود است و بخش دوم گرمای برگشت‌ناپذیر ناشی از محدودیت انتقال جرم، مقاومت اهمی و مقاومت قطبی شدن است [۲۱]. فرآیند تولید گرما به طور کلی می‌تواند به گرمای ژول، گرمای واکنش و گرمای واکنش جانبی تقسیم شود. نرخ تولید گرما سلول باتری توسط برناردی و همکاران [۲۲] به صورت رابطه (۷) است.

$$Q_{gen} = I(U_{ocv} - U) - IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (7)$$

I جریان شارژ و تخلیه‌ی و R، مقاومت الکتریکی سلول باتری است. U_{ocv} ولتاژ مدار باز و U ولتاژ باتری است. در طی فرایند تخلیه از رابطه (۸) ولتاژ باتری محاسبه می‌شود.

کانال گرم با ورودی سینوسی نشان دادند که افزایش سختی و طول پرها عدد ناسلت را می‌افزاید اما افت فشار را نیز بالا می‌برد؛ به‌طور خاص، طول ۳ میلی‌متر به افزایش ۸۲٪ ناسلت و بهبود ۱۰٪ شاخص عملکرد حرارتی منجر شد.

چاو و همکاران [۱۷] به بررسی عملکرد صفحات خنک‌کاری موجی شکل برای مازول باتری استوانه‌ای به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. چهار طرح برای مدیریت گرمایی مازول باتری طی فرآیند خنک‌کاری و پیش گرمایش ارائه و از منظر راندمان گرمایی و یکنواختی گرمایی بررسی کردند. طرح بهینه توانست تا ۲۸٪ عملکرد خنک‌کاری را بهبود دهد.

موسوی [۱۸] به بررسی و بهینه‌سازی مشخصه‌های طراحی مبادله‌کن گرمایی فشرده برای باتری ولتاژ بالای خودرو هیبرید پرداخت. نتایج کاهش جرم ۵۵٪ و افزایش توان انتقال حرارت ۴/۱٪ نسبت به مدل پایه را نشان می‌دهد.

ژائو و همکاران [۱۹] به بررسی عددی سیستم مدیریت گرمایی مازول گرمایی باتری خودرویی شامل ۷۱ سلول باتری لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ می‌پردازند. نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

۱- افزایش دشارژ شارژ نرخ C منجر به دمای بالاتر و بدتر شدن یکنواختی دما در مازول باتری می‌شود.

۲- افزایش نرخ جریان مایع می‌تواند به طور قابل توجهی دما را کاهش دهد و یکنواختی دما را در مازول باتری بهبود بخشد.

۳- افزایش منطقه تبادل گرما بین باتری‌های همسایه کمی باعث بهبود یکنواختی دما در مازول باتری می‌شود، اما تنها تأثیر ناچیزی بر کاهش دمای مازول دارد.

۴- افزایش سطح رابط باتری و دیواره خارجی کانال می‌تواند به طور قابل توجهی حداکثر دما را در مازول باتری کاهش دهد اما یکنواختی دما را در مازول بدتر می‌کند.

چنانچه در مروری بر مطالعات پیشین مشاهده گردید پژوهش‌های متعددی در زمینه شبیه سازی عددی جریان خنک‌کننده در میکروکانال با کاربرد آن در خنک‌کاری باتری انجام شده است. تفاوت عمده مطالعه پیش رو با دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه که نوآوری‌های اصلی این کار نسبت به آنها محسوب می‌شود به شرح زیر است:

۱- مدیریت گرمایی بسته باتری در کلاس خودرویی با ۳۸۵ سلول باتری لیتیوم-یون ۲۱۷۰۰، با ظرفیت الکتریکی ۵/۵ کیلووات ساعت و ولتاژ خروجی ۴۳ ولت بررسی شده است. در مطالعات پیشین تعداد سلول‌های در ارتباط با یک میکروکانال محدود بوده است و اثر افزایش دمایی سیال خنک‌کننده در طول مسیر حائز اهمیت نبوده است، اما در این پژوهش با در نظر گرفتن کاربرد صنعتی این نوع از سامانه خنک‌کاری این مشخصه تأثیرگذار بررسی شده است.

۲- تغییرات دمای سلول‌های مازول باتری به صورت گذرا در نرخ جریان‌های ۲C و ۳C مورد مطالعه قرار گرفته است. این حالت موجب می‌گردد تا موضوع گرم شدن باتری و همچنین مدت زمانی که باتری از نظر گرمایی توان کار در شرایط تمام بار را داشته باشد مورد بررسی قرار گیرد.

۳- دو الگو میکروکانال موجدار مورد بررسی قرار گرفت. در الگو بهبودیافته نوافض طرح ابتدایی رفع گردیده است. زاویه تماس باتری و

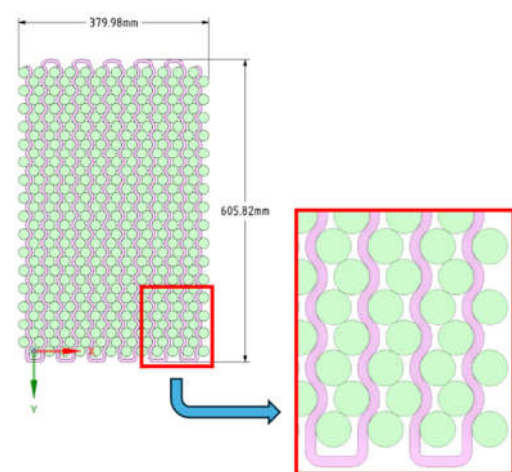
جدول ۲- صحنه‌گذاری شبیه‌سازی

مدل	دما (درجه سلسیوس)
شبیه‌سازی	۴۹/۳۶۹
آزمایشگاهی [۲۵]	۴۹/۴۶۵

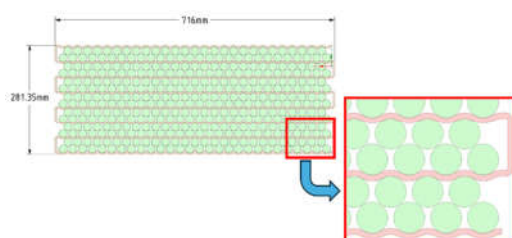
استفاده از روش گرما ثابت از ساده‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش است. زیرا استفاده از مدل‌های دقیق‌تر نظیر NTGK، سبب افزایش پیچیدگی هندسه، افزایش تعداد شبکه و پیچیدگی بسیار زیاد فرآیند پیش پردازش می‌گردد. از این رو با توجه به ابعاد مسئله از این روش گرما ثابت استفاده شد که انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۳- روش حل عددی

برای حل مسئله حاضر از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار ANSYS Fluent 2021، استفاده شده است. مدل حل جریان آرام است زیرا در کلی شبیه‌سازی‌ها عدد رینولدز از ۲۳۰۰ فراتر نیست. روش گسسته‌سازی معادله دیفرانسیل، Upwind مرتبه دوم و الگوریتم Coupled حل معادلات فشار-سرعت است. در شکل ۲ شما و ابعاد هندسه اولیه و نهایی ارائه شده است.



الف



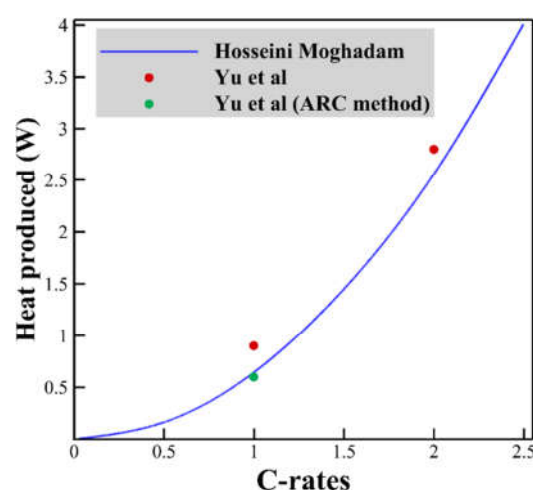
$$U = U_{ocv} - IR \quad (8)$$

در نتیجه رابطه‌ی نرخ تولید گرمای باتری به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$Q_{gen} = I^2 R - IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (9)$$

در پژوهش مقدم [۲۳] نمودار نرخ تولید گرما بر حسب نرخ‌های تخلیه‌ی متفاوت آمده است. در شکل ۱- گرمای تولید شده در نرخ تخلیه‌های متفاوت در پژوهش مقدم [۲۳] و یو و همکاران [۲۴] ارائه شده است. مقایسه‌ی این نمودار با نتایج یو و همکاران [۲۴] به روش آزمایشگاهی کالری سنج شتاب دهنده، وجود خطای اندکی را نشان می‌دهد.

شکل ۱ صحت برازش منحنی ارائه شده توسط مقدم و همکاران [۲۳] را نشان می‌دهد، در ادامه از داده‌های نمودار برای گرمای تولیدی باتری استفاده شده است. با در نظر گرفتن نمودار شکل ۱، مقدار نرخ تولید گرما بر حسب نرخ‌های تخلیه‌ی متفاوت در جدول ۱ آمده است. توجه شود که مقدار نرخ تولید گرما در نرخ تخلیه‌ی ۳C به روش برون‌یابی محاسبه شده است.



شکل ۱- گرمای تولید شده در نرخ تخلیه‌های متفاوت در پژوهش مقدم [۲۳] و یو و همکاران [۲۴]

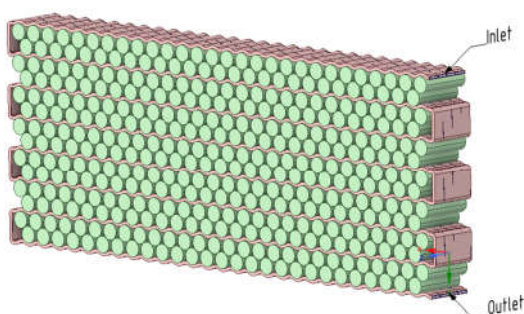
جدول ۱- نرخ تولید گرمای سلول باتری ۲۱۷۰۰ در نرخ تخلیه‌های متفاوت

نرخ جریان	توان تولید گرما (W)
C1	۰٫۶۴۳
C2	۲٫۵۵۹
C3	۵٫۷۷۸

جهت صحنه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی، بیشینه دمای یک تک سلول باتری در محیط با دمای ۲۵ درجه سلسیوس با نتایج آزمایشگاهی مطابق جدول ۲ با خطای ۰/۱۹٪ مقایسه گردیده است [۲۵].

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1073 \times 1.41 \times 0.005}{0.0033} = 2292 < 2300 \quad (10)$$

ضریب انتقال گرمای همرفتی دیواره بیرونی ۵ وات بر متر مربع کلونین و دمای محیط اطراف و سیال ورودی ۲۹۸/۱۵ کلونین به نرم افزار داده شد. در شکل ۳، محل قرارگیری ورودی و خروجی میکروکانال قابل مشاهده است. مقاومت گرمایی سطح رابط باتری با میکروکانال، برابر ۰/۰۰۲۵ متر مربع کلونین بر وات، فرض می‌شود [۲۷]. در جدول شرایط مرزی حاکم بر مسئله را به صورت خلاصه ارائه شده است.



شکل ۳- محل ورودی و خروجی جریان در میکروکانال

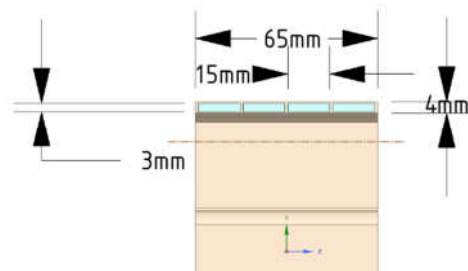
در شبیه‌سازی گذرا برای نرخ تخلیه ۲ و ۳C، برای شرایط اولیه، دما ۲۹۸/۱۵ کلونین و سیال ساکن در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- شرایط مرزی

میزان	نام شرایط مرزی
متر (۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۱)	سرعت ورودی سیال به میکروکانال
بر ثانیه به صورت پایا	
متر بر ثانیه (۰/۲۳ و ۱/۴۱)	
به صورت پایا و گذرا	نرخ تخلیه ۲C
متر بر ثانیه به صورت گذرا	نرخ تخلیه ۳C
مطابق جدول ۱	میزان تولید گرما
کلونین ۲۹۸/۱۵	دمای سیال ورودی به میکروکانال
۱۰۱۳۲۵ پاسکال	فشار خروجی میکروکانال
۵ وات بر متر مربع کلونین	ضریب انتقال گرمای دیواره‌های خارجی
کلونین ۲۹۸/۱۵	دمای محیط
۰/۰۰۲۵ متر مربع کلونین بر وات	مقاومت گرمایی سطح رابط باتری و میکروکانال

۳-۱- استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال از شبکه، شبیه‌سازی در شرایطی که سیال خنک‌کن با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه، وارد میکروکانال می‌گردد، انجام شده است. انرژی گرمایی تولیدی در سلول‌های باتری معادل شدت جریان ۰/۵C است. شکل ۴ نتایج استقلال از شبکه را نشان می‌دهد. بر این اساس شبکه‌بندی با ۱۰۷۹۰۷۶۸۱ سلول برای ادامه محاسبات انتخاب می‌شود. شکل ۵- نمای نزدیک از شبکه بندی نهایی مسئله را نشان می‌دهد.



ب

شکل ۲- نما و ابعاد الف) هندسه اولیه، ب) هندسه نهایی

سیال کاری آب و اتیلن گلیکول ۵۰:۵۰ که خواص فیزیکی آن بر حسب دما به کمک مرجع [۲۶] استخراج شده است، در نرم‌افزار تنظیم شده است. جنس میکروکانال آلومینیوم است. خواص فیزیکی میکروکانال و باتری لیتیوم- یون ۲۱۷۰۰ در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳- خواص فیزیکی میکروکانال و باتری ۲۱۷۰۰

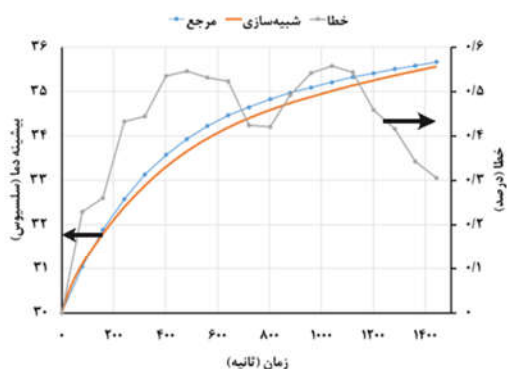
ماده	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلونین)	رسانایی گرمایی (وات بر متر مربع کلونین)
آلومینیوم	۲۷۱۹	۸۷۱	۲۰۲/۴
باتری ۲۱۷۰۰ [۱۲]	۲۶۱۵/۷	۱۶۰۵	۳

شرایط مرزی حل در ورود و خروج به ترتیب به صورت سرعت ورودی در ورود و فشار خروجی در خروج در نظر گرفته شد. در عمده مطالعات انجام شده بر روی سامانه مدیریت گرمایی باتری لیتیوم- یون به کمک میکرو کانال [۱۴]، [۱۱] و [۱۹]، جریان داخل میکرو کانال از نوع آرام در نظر گرفته شده‌اند. علت اصلی این موضوع مربوط به افت فشار جریان است. با توجه به طول و باریک بودن مجاری میکرو کانال، در صورتی که رژیم جریان به آشفته تغییر کند، افت اصطکاکی و در نتیجه کار مورد نیاز از پمپ به مراتب افزایش می‌یابد. از این رو با توجه به ابعاد مقطع عبور جریان سیال در میکروکانال و خواص سیال اتیلن گلیکول و آب در بازه دمایی مورد مطالعه (جدول ۴)، حداکثر سرعت جریان به گونه‌ای تعیین شده است که جریان وارد رژیم گذرا و آشفته نشود و عدد رینولدز کمتر ۲۳۰۰ در محدود جریان لایه‌ای باشد.

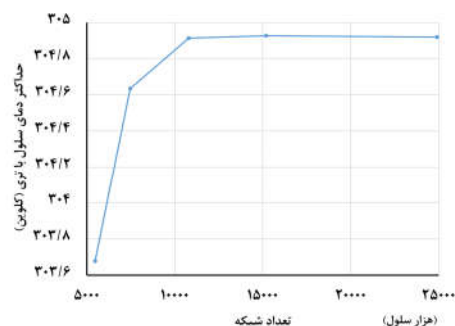
۴- خواص سیال و جریان درون میکروکانال

مشخصه	میزان
سطح مقطع عبور جریان	۰/۰۰۰۴۵ متر مربع
قطر هیدرولیک	۰/۰۰۵ متر
چگالی سیال	۱۰۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب
لزجت دینامیکی سیال	۰/۰۰۳۳ نیوتن ثانیه بر مترمربع
سرعت سیال	۱/۴۱ متر بر ثانیه

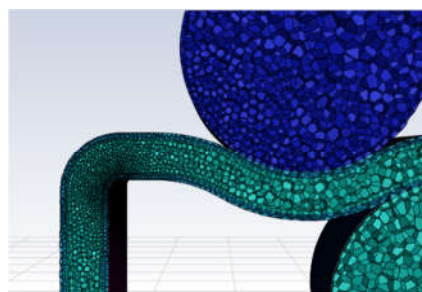
از این رو با استفاده از رابطه (۱۰)، عدد رینولدز در بیشینه سرعت مقداری کمتر ۲۳۰۰ دارد و در نتیجه جریان همواره آرام است.



شکل ۷- تغییرات دمای بیشینه بسته باتری برای مرجع [۲۷] و شیب‌سازی حاضر به همراه خطا



شکل ۴- استقلال از شبکه



شکل ۵- نمای نزدیک از شبکه بندی نهایی مسئله

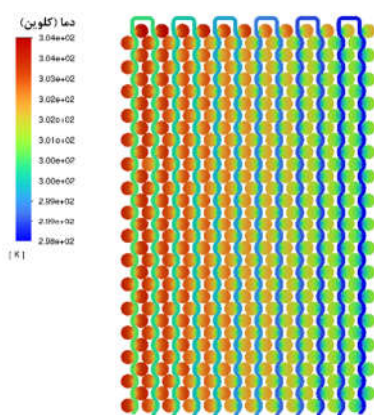
۴- نتایج

در ابتدا روند دستیابی به طرح مناسب برای میکروکانال ماژول باتری ارائه و سپس نتایج خنک‌کاری این سامانه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۴-۱- هندسه مناسب

طراحی هندسه میکروکانال ماژول باتری، فرآیندی رفت و برگشتی است که نیاز دارد ایرادات آن طی مراحل مختلف رفع گردد. در ادامه مشخصات هندسه اولیه در کنار هندسه نهایی و نیز عیوبی که پس از بررسی رفع شده، ارائه گردیده است. شکل ۲- الف، نمای بالای هندسه اولیه و ابعاد آن را نشان می‌دهد. در این طرح ۳۸۴ عدد باتری لیتیوم-یون، با زاویه تماس ۳۰ بین میکروکانال و باتری، ۱۱ اتصال U شکل و سطح اشغال شده تقریبی ۲۳۰۰ سانتی متر مربع در کنار هم قرار گرفته‌اند.

شکل ۸، توزیع دما در هندسه اولیه برای نرخ جریان ۱C و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه را در صفحه میانی نشان می‌دهد.



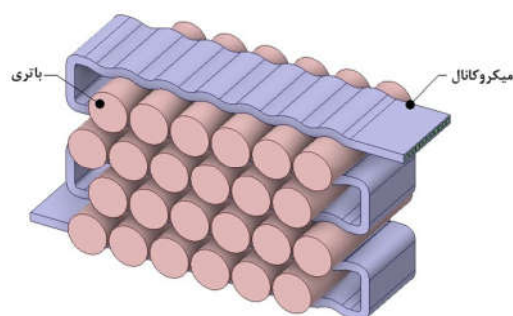
شکل ۸- توزیع دما در هندسه اولیه

ایرادات این هندسه به شرح زیر است:

دمای سلول‌های باتری ردیف فوقانی در تماس با اتصال U شکل، به دلیل کاهش سطح تماس میان باتری و میکروکانال افزایش یافته

۳-۲- اعتبارسنجی

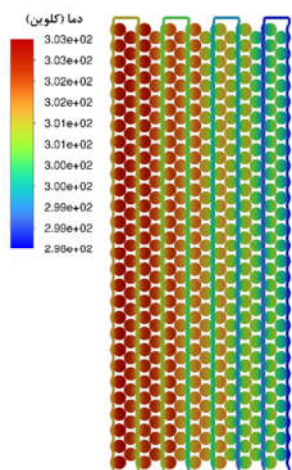
به منظور اطمینان از صحت روش حل مسئله، شیب‌سازی هندسه مطابق با شکل ۶، از مرجع [۲۷] انجام شد. بسته باتری مورد بررسی متشکل از ۲۴ سلول لیتیوم-یون NCM1۸۶۵۰، با میکروکانال ۸ راهه است. گرمای تولیدی بر اساس معادلات برناردی [۲۲] و شرایط مرزی در ورودی، دبی جرمی با نرخ ۰/۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است.



شکل ۶- هندسه مرجع [۲۷] جهت اعتبارسنجی

شکل ۷، تغییرات دمای بیشینه بسته باتری برای مرجع [۲۷] و شیب‌سازی حاضر به همراه خطای آن‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس حداکثر خطا ۰/۵۶ درصد است که نشان از دقت خوب شیب‌سازی است.

این اختلاف دما در نرخ جریان ۱C کمتر از ۵ کلوین است و ماژول باتری بدون مشکل مدیریت گرمایی می‌تواند به فعالیت خود تا اتمام فرآیند شارژ ادامه دهد.



شکل ۱۰- کانتور دما در نرخ جریان ۱C و سرعت ورودی سیال ۰/۱ متر بر ثانیه

در شدت جریان ۲C، برای سرعت سیال خنک‌کاری مقادیر سرعت ۰/۲۳ و ۱/۴۱ متر بر ثانیه به صورت پایا بررسی شد. منشأ سرعت ۱/۴۱ متر بر ثانیه، حد لایه‌ای بودن رژیم جریان داخل میکرو کانال است [۱۴، ۱۱]. جدول ۵، کمینه دما و بیشینه دمای سلول‌های ماژول باتری به همراه افت فشار میکروکانال نشان می‌دهد.

شکل ۱۱، کانتور دما، سرعت ورودی سیال ۱/۴۱ متر بر ثانیه برای نرخ جریان ۲C، نشان می‌دهد. بر خلاف نرخ جریان ۱C، در نرخ جریان ۲C، سامانه مدیریت گرمایی توانایی حفظ گرادیان دمایی کمتر از ۵ کلوین را برای ماژول باتری ندارد.

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی شدت جریان ۲C

سرعت جریان ورودی سیال (متر بر ثانیه)	بیشینه دما (کلوین)	کمینه دما (کلوین)	افت فشار (پاسکال)
۰/۲۳	۳۱۱/۶۸۷	۲۹۸/۵۴۹	۱۰۴۵۰
۱/۴۱	۳۰۷/۱۰۶	۲۹۸/۱۵۴	۱۰۰۰۰

است. برای رفع این عیب و افزایش یکنواخت دما در طول مسیر جریان، لازم است سطح تماس میان تمامی باتری‌ها و میکرو کانال برابر باشد. تعداد زیاد اتصالات U شکل سبب افزایش افت فشار میکروکانال و در نتیجه کار پمپ گردش سیال می‌شود. از این رو کاهش تعداد اتصالات U شکل از کار جریان مطلوب است.

زاویه تماس ۳۰ درجه میان باتری و میکروکانال سبب ایجاد فضای مرده میان باتری‌ها شده که بی‌دلیل حجم نهایی ماژول را افزایش می‌دهد. پس از مطالعه و الگوبرداری از سایر نمونه‌های موجود در کلاس جهانی (شکل ۹)، زاویه تماس مناسب ۶۰ درجه به عنوان زاویه بهینه انتخاب شد. سپس ماژول بر مبنای دو مطلب فوق باز طراحی شد. در ادامه میزان افزایش کارایی طراحی جدید با طراح اولیه بررسی گردید.



شکل ۹- ماژول باز و بررسی شده خودرو Tesla با سلول ۱۸۶۵۰.

در نهایت هندسه مورد استفاده نهایی مطابق شکل ۲- ب بوده که شامل ۳۸۵ باتری لیتیوم- یون، ۷ اتصال U شکل و سطح تقریبی اشغال شده ۲۰۰۰ سانتی متر مربع است.

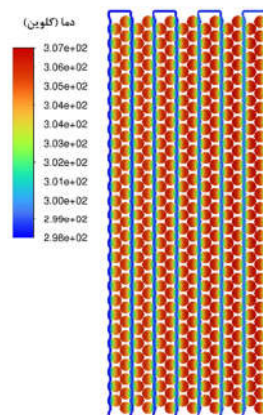
۴-۲- فرآیند خنک‌کاری

برای شدت جریان ۱C، در سرعت سیال خنک‌کاری برای مقادیر ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۱ متر بر ثانیه به صورت پایا بررسی شد. جدول ۴، کمینه دما و بیشینه دمای سلول‌های ماژول باتری به همراه افت فشار میکروکانال نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی شدت جریان ۱C

سرعت جریان ورودی سیال (متر بر ثانیه)	بیشینه دما (کلوین)	کمینه دما (کلوین)	افت فشار (پاسکال)
۰/۰۲	۳۰۴/۸	۲۹۸/۱۵	۹۰۰
۰/۰۵	۳۰۳/۹	۲۹۸/۱۵	۱۸۰۰
۰/۱	۳۰۳/۱	۲۹۸/۱۵	۴۰۰۰

بر این اساس سرعت ورودی، ۰/۱ متر بر ثانیه، توانایی تأمین گرادیان دمایی کمتر از ۵ کلوین را داخل ماژول باتری دارد. شکل ۱۰ کانتور دما، را سرعت ورودی سیال ۰/۱ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با پیشروی سیال در میکروکانال دمای سیال افزایش می‌یابد که خود سبب اختلاف دمای سلول‌های باتری ابتدای جریان با سلول‌های انتهایی می‌شود. با این حال



شکل ۱۱- کانتور دما در نرخ جریان ۲C و سرعت ورودی سیال ۱/۴۱ متر بر ثانیه

همان طور که پیشتر اشاره شد گرادیان دمایی بیش از ۵ کلوین سبب اختلال در عملکرد ماژول باتری می‌گردد؛ از این رو اتخاذ یک روش نوین برای مدیریت گرمایی ماژول باتری از اهمیت بالایی برخوردار است. در این روش پیش از رسیدن حداکثر اختلاف دما در ماژول به باتری عملکرد آن محدود می‌شود تا از آسیب ماژول باتری جلوگیری شود. این روش به صورت الگوریتم در سامانه مدیریت باتری (BMS) قرار می‌گیرد و در شدت جریان‌های مدنظر اعمال می‌شود.

به منظور اطلاع از زمان رسیدن به حداکثر اختلاف دما در نرخ جریان ۲C و ۳C لازم است شبیه‌سازی‌ها در این نرخ جریان‌ها به صورت گذرا صورت پذیرد تا حداکثر زمانی که این سامانه توانایی مدیریت گرمایی ماژول باتری را دارد، محاسبه گردد. شبیه‌سازی گذرا، در نرخ جریان ۲C، برای سرعت ورودی سیال ۱/۴۱ متر بر ثانیه انجام می‌شود. بر این اساس سامانه خنک‌کاری توانایی مدیریت گرمایی را برای ۲۵۷ ثانیه در نرخ جریان ۲C دارد. در نرخ جریان ۳C این زمان به ۸۶ ثانیه می‌رسد.

در این بخش از پژوهش تاثیر دو مشخصه نرخ تخلیه سلول باتری و سرعت جریان در میکروکانال، میزان بیشینه دما و گرادیان دما بررسی شد. با افزایش نرخ تخلیه، میزان گرمای تولیدی و در نتیجه میزان دما افزایش می‌یابد. در نرخ تخلیه ۱C، سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه الزامات بیشینه دما و گرادیان دمای ماژول باتری طی شرایط پایا را محقق می‌کند؛ با این حال تغییرات دما از سلول‌های نزدیک ورودی تا سلول‌های نزدیک به خروجی قابل مشاهده است. با افزایش نرخ تخلیه و نیز محدودیت در میزان افزایش سرعت جریان، سامانه مدیریت گرمایی دیگر توانایی حفظ گرادیان دما ماژول باتری در محدوده تعیین شده را ندارد از این رو زمان کارکرد ماژول در آن نرخ تخلیه ۲ و ۳C، محدود می‌شود.

۴-۳- بررسی راندمان گرمایی

راندمان گرمایی مشخصه‌ای جهت ارزیابی عملکرد روش خنک‌کاری است. راندمان گرمایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷].

$$\text{Thermal Efficiency} = \frac{T_{\text{no cooling}} - T_{\text{proposed model}}}{T_{\text{no cooling}}} \quad (11)$$

$T_{\text{no cooling}}$ ، بیشینه دمای بسته در حالت عدم استفاده از سامانه خنک‌کاری، $T_{\text{proposed model}}$ ، بیشینه دمای بسته در حالت استفاده از طرح پیشنهادی است.

جدول ۶، مقایسه راندمان و یکنواختی گرمایی در طرح اولیه و نهایی پیشنهادی را در نرخ جریان ۱C نشان می‌دهد. سرعت ورودی جریان سیال در هر دو میکروکانال ۰/۱ متر بر ثانیه است. بر این اساس حذف سلول‌های باتری در تماس با اتصال U شکل و افزایش سطح تماس باتری میکروکانال توانست عملکرد سامانه مدیریت گرمایی را به میزان ۲/۳٪ افزایش دهد.

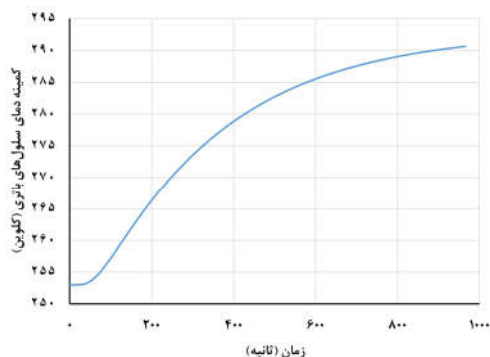
جدول ۶- مقایسه راندمان و یکنواختی گرمایی در طرح‌های پیشنهادی در نرخ جریان ۱C

مدل	بدون خنک‌کاری	طرح ابتدایی	طرح نهایی
بیشینه دمای بسته باتری (°C)	۴۹/۳۷	۳۱/۰۸	۲۹/۹۵
راندمان گرمایی	-	۳۷٪	۳۹/۳٪

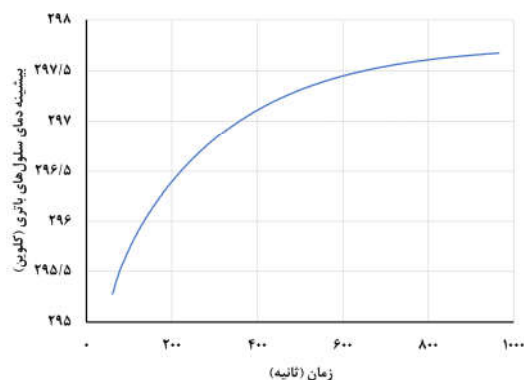
۴-۴- فرآیند پیش گرمایش

در کنار اهمیت فرآیند خنک‌کاری، فرآیند پیش گرمایش در ماژول‌های باتری خودرویی دارای اهمیت است و دلیل آن، دمای پایین محیط در فصل زمستان و بازه محدود دمایی عملکردی باتری‌های لیتیوم-یون (بین ۲۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس) است. به منظور اطلاع از زمان فرآیند پیش گرمایش، عملکرد مناسب سامانه مدیریت گرمایی و در نهایت تهیه الگوریتم سامانه مدیریت باتری، لازم است شبیه‌سازی این فرآیند صورت گیرد. هدف از ارائه این بخش بررسی عملکرد سامانه مدیریت گرمایی طراحی شده برای خنک‌کاری در کاربری پیش گرمایش است.

بر اساس سرعت ورودی ۱/۴۱ متر بر ثانیه، دمای اولیه ۲۰- درجه سلسیوس و دمای سیال ورودی ۲۵ درجه سلسیوس، شبیه‌سازی گذرا صورت گرفته است. شکل ۱۲ و شکل ۱۳، به ترتیب تغییرات دمای کمینه و بیشینه ماژول پیش گرمایش در سرعت جریان ۱/۴۱ متر بر ثانیه را نشان می‌دهند. در این شرایط، کمینه دما ماژول باتری، در لحظه ۸۸۵ ثانیه به ۲۹۰ کلوین می‌رسد.



شکل ۱۲- تغییرات دمای کمینه ماژول پیش گرمایش سرعت جریان ۱/۴۱ متر بر ثانیه



شکل ۱۳- تغییرات دمای بیشینه مازول پیش گرمایش سرعت جریان ۱/۴۱ متر بر ثانیه

در خودروی الکتریکی منشأ اصلی توان الکتریکی باتری لیتیوم یون است. با توجه به لزوم تأمین توان الکتریکی برای فعالیت المانهای گرمایشی، به منظور عدم آسیب به ساختار باتریهای لیتیوم یون طی فرآیند راه اندازی، در عمل هیچگاه دمای مازول باتری از محدوده دمای کاری تعریف شده برای باتری نباید خارج شود. و در شب هنگام و زمانهای خاموشی خودرو، BTMS (سامانه مدیریت گرمایی باتری)، فرآیند گرم نگه داشتن مازول باتری را انجام می دهد. از طرف دیگر با توجه به استفاده از گرمکنهای الکتریکی دمای ورودی سیال به مازول باتری می تواند مقداری بالاتری از ۴۰ درجه سلسیوس داشته باشد. در نتیجه این دو راهکار، می توان زمان پیش گرمایش را کاهش داد.

۵- نتیجه گیری

حفظ دمای مازول باتریهای لیتیوم یون در محدوده عملکردی تأثیر بسزایی در ایمنی و عملکرد آنها دارد. همچنین یکنواختی توزیع دما تا میزان ۵ کلوین در مازول باتری سبب عملکرد بهتر سیستم تولید توان الکتریکی و طول عمر بیشتر مازول می گردد. در پژوهش صورت گرفته پس از طراحی هندسه سیستم خنک کاری شامل ۳۸۵ باتری لیتیوم یون ۲۱۷۰۰ و میکروکانال، به کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی، به بررسی دبی سیال خنک کاری به منظور حفظ شرایط دمایی مازول باتری، طی نرخ جریانهای ۱C، ۲C و ۳C پرداخت شده است. زاویه تماس تمامی باتریها با میکروکانال ۶۰ درجه تنظیم شده است. در نرخ جریان ۱C، شرایط مطلوب دمایی با سرعت سیال ۰/۱ متر بر ثانیه به صورت پایدار (عدم تجاوز از دمای ۴۰ درجه سلسیوس و گرادیان دمای زیر ۵ درجه سلسیوس) محقق می گردد؛ ولی در نرخ جریانهای بالاتر با فرض حداکثر سرعت ورودی میکروکانال ۱/۴۱ متر بر ثانیه (به منظور حفظ رژیم جریان لایه ای)، سیستم خنک کاری توانایی حفظ شرایط مطلوب دمایی را تنها برای ۲۵۷ ثانیه در نرخ جریان ۲C و ۸۶ ثانیه در نرخ جریان ۳C دارد افزایش زمان عملیاتی مازول باتری (از منظر دمایی) در نرخ جریانهای بالاتر، سبب افزایش توان در دسترس موتور الکتریکی شده و در نتیجه دینامیک شتابگیری خودرو را بهبود می دهد. از این رو، اطلاع از این زمانها برای طراحی عملکرد خودرو تعیین کننده است. همچنین در این مطالعه نظر به اهمیت مدیریت گرمایی مازول باتری در فصول سرد، مطالعه

فرآیند پیش گرمایش نیز صورت گرفت. طی این بررسی زمان رسیدن حداقل دمای مازول باتری به ۲۹۰ کلوین با فرض دمای اولیه ۲۰- درجه سلسیوس، سرعت ورودی سیال ۱/۴۱ متر بر ثانیه و دمای سیال ورودی ۲۵ درجه سلسیوس، ۸۸۵ ثانیه است. مدیریت صحیح زمان پیش گرمایش سبب افزایش سهولت در استفاده خودرو می گردد. همچنین استفاده از طرح بهبود یافته راندمان گرمایی را از ۳۷٪ طرح ابتدایی، به میزان ۳۹/۳٪ افزایش داد. این افزایش راندمان به طور مستقیم توان اتلافی در سامانه خنک کاری را کاهش می دهد. در مطالعات پیشین با توجه به کوتاه تر بودن طول میکروکانال و تعداد سلولهای کمتر، گرادیان دما میان سلولهای ابتدا و انتهای میکروکانال در نظر گرفته نمی شد. در این پژوهش بر مبنای کنترل گرادیان دما، مدت زمان عملکرد مازول باتری در در نرخ تخلیه های ۲ و ۳C، جهت پیشگیری از آسیب مازول، تعیین شد. با توجه به استفاده از مدل گرما ثابت برای منبع گرما در سلولهای باتری، پیشنهاد می شود در پژوهشهای آتی از روشها با دقت بیشتر نظیر، NTGK، استفاده و اثر شار گرمایی در قطبهای باتریها مورد مطالعه قرار گیرد.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند مراتب قدردانی و سپاسگزاری صمیمانه خود را از کارخانه نوآوری و صنایع خلاق امپیر و مدیریت دلسوزانه آقای دکتر کرمی به جهت حمایت مالی و دانشی در خلال انجام این پژوهش ابراز دارند.

۷- مراجع

- [1] Zhang Z, Li W, Zhang C, Chen J. Climate control loads prediction of electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:1183-8.
- [2] Nazari A, Farhad S. Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries. *Applied Thermal Engineering*. 2017;125:1501-17.
- [3] Wang Y-F, Wu J-T. Performance improvement of thermal management system of lithium-ion battery module on purely electric AUVs. *Applied Thermal Engineering*. 2019;146:74-84.
- [4] Kim J, Oh J, Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied thermal engineering*. 2019;149:192-212.
- [5] Feng X, Fang M, He X, Ouyang M, Lu L, Wang H, Zhang M. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry. *Journal of power sources*. 2014;255:294-301.
- [6] Bandhauer TM, Garimella S, Fuller TF. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the electrochemical society*. 2011;158(3):R1.
- [7] Tete PR, Gupta MM, Joshi SS. Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct. *Journal of Energy Storage*. 2022;48:104041.
- [8] Basu S, Hariharan KS, Kolake SM, Song T, Sohn DK, Yeo T. Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system. *Applied Energy*. 2016;181:1-13.
- [9] میر محمدی ع، الهیاری س. طراحی سیستم خنک کاری برای باتری لیتوم-یون در نرخ دشارژهای مختلف با مدل سازی الکتریکی-حرارتی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۱؛ ۵۱(۱):۲۳۹-۴۶.

- [۱۰] رحمانیان کوشکچی ح، رحمانیان س. بررسی عددی مدیریت گرمایی باتری لیتیوم- یون با استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۴؛۵۴(۳):۱۲۳-۳۲.
- [11] Xie L, Huang Y, Lai H. Coupled prediction model of liquid-cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion module. *Applied Thermal Engineering*. 2020;178:115599.
- [12] Tousi M, Sarchami A, Kiani M, Najafi M, Houshfar E. Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath. *Journal of Energy Storage*. 2021;41:102910.
- [13] Li W, Garg A, Xiao M, Gao L. Optimization for Liquid Cooling Cylindrical Battery Thermal Management System Based on Gaussian Process Model. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2020;13(2).
- [14] Tang Z, Min X, Song A, Cheng J. Thermal management of a cylindrical lithium-ion battery module using a multichannel wavy tube. *Journal of Energy Engineering*. 2019;145(1):04018072.
- [۱۵] فرهنگ مهر و، شافعی آسایش ا. مطالعه عددی جریان نانوسیال و انتقال گرما در یک میکروکانال با یک ریب آشوب ساز جریان. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۰؛۵۰(۱):۱۴۷-۵۴.
- [۱۶] آهنگر زنوزی س، عزیزی ع. بررسی عددی انتقال گرمای جریان سیال در کانال شامل استوانه با دو مولد گردابه انعطاف‌پذیر تحت شرایط جریان ورودی سینوسی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۵؛۵۴(۴):۶۷-۷۶.
- [17] Cha H-R, Angani A, Hwang M-H. Thermal management of lithium-ion batteries by novel designs of wavy cold plates: Performance comparison. *Journal of Energy Storage*. 2023;73:109303.
- [۱۸] موسوی سع. بهینه سازی مبادله‌کن گرمایی فشرده باتری ولتاژ بالای خودروی هیبریدی به‌منظور افزایش توان گرمایی و کاهش جرم. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۵؛۵۵(۱-۹):۲۵.
- [19] Zhao C, Cao W, Dong T, Jiang F. Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow. *International journal of heat and mass transfer*. 2018;120:751-62.
- [20] Pulugundla G, Dubey P, Wu Z, Wang Q, Srouji AK, editors. *Thermal Management of Lithium Ion Cells at High Discharge Rate using Submerged-Cell Cooling*. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC); 2020 23-26 June 2020.
- [21] Heubner C, Schneider M, Michaelis A. Detailed study of heat generation in porous LiCoO₂ electrodes. *Journal of Power Sources*. 2016;307:199-207.
- [22] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society*. 1985;132(1):5.
- [23] Moghaddam SMH. Designing battery thermal management systems(BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD [Master of Science Thesis]2019.
- [24] Yu X, Wu Q, Huang R, Chen X. A Novel Heat Generation Acquisition Method of Cylindrical Battery Based on Core and Surface Temperature Measurements. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2021;19:1-17.
- [25] Lin C, Wen H, Liu L, Liu S, Ma T, Fan B, Wang F. Heat generation quantification of high-specific-energy 21700 battery cell using average and variable specific heat capacities. *Applied Thermal Engineering*. 2021;184:116215.
- [26] ASHRAE AHF. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc, Atlanta. 2009.
- [27] Guo J, Liu F, Xu Y, Han B, Li M. Optimization design and numerical study of liquid-cooling structure for cylindrical lithium-ion battery pack. *Journal of Energy Engineering*. 2021;147(4):04021017.