ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(11):687-695

Experimental Study of The Thermal Management System for A Lithium-Ion Battery Using the Heat Pipe

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]

[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Alihosseini A. [1],
Shafaee M. [1*],
Ghasemian S.[2]

How to cite this article
Alihosseini A, Shafaee M, Ghasemian S. Experimental Study of The Thermal Management System for A Lithium-Ion Battery Using the Heat Pipe. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(11):687-695.

[1] Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2] Mechanical Faculty, Iran University of Science and Technnology, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.
mshafaee@ut.ac.ir

Article History
Received: April 09, 2022
Accepted: July 09, 2022
ePublished: November 18, 2022

ABSTRACT

One of the main problems in the commercial use of lithium-ion batteries for high energy consumption is the heat problems associated with these batteries. Since many batteries are used together in order to generate higher power, it is important to predict their thermal performance. In this study, a heat management system of a lithium-ion battery equipped with a heat pipe is investigated. For this purpose, a part of a battery pack consisting of two batteries and a heat pipe is selected and its performance is experimentally investigated. These tests are performed at various ambient temperatures through a made test chamber with the ability to accurately control temperature. The experimental results show that although with increasing ambient temperature, the battery surface temperature increases, but due to the decrease in thermal resistance of the heat pipe, the effect of this temperature rise can be moderated and work as an active method. In addition, using forced convection in the condenser section, not only can the battery surface temperature be controlled below 40 ˚C, but it also distributes the temperature uniformly over the battery surface. The use of the heat pipe also helps to maintain more stable temperature conditions with lower temperature fluctuations in consecutive battery cycles.

Keywords Lithium-Ion Battery, Heat Pipe, Thermal Management System, Battery Equivalent Circuit, Thermal Resistance.

CITATION LINKS

1- A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric ... 2- A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries ... 3- Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. 4- Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal ... 5- Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery ... 6- High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active–passive ... 7- Battery thermal management in EV and HEVs ... 8- Thermal performance of lithium-ion battery thermal management ... 9- Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material ... 10- Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high-power lithium-ion ... 11- Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted ... 12- Design optimization of a loop heat pipe to cool a lithium ion battery ... 13- A critical review of battery thermal performance and liquid based battery ... 14- Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling ... 15- Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal ... 16- An experimental study of heat pipe thermal management system ... 17- Heat dissipation design for lithium-ion batteries. 18- Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries ... 19- Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications. 20- Experimental investigation on thermal management of electric vehicle ... 21- Experimental study of an OHP-cooled thermal management system ... 22- Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle ... 23- Experimental investigation on EV battery cooling and heating ... 24- Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid ... 25- A theoretical and computational study of lithium-ion battery ... 26- Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models ... 27- Comparison study of equivalent circuit model of Li-Ion battery ... 28- Numerical simulation of a cylindrical heat pipe and performance study.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی سیستم مدیریت حرارت یک باتری لیتیوم-یون با استفاده از لوله حرارتی

عطیه علی‌حسینی[۱]، مازیار شفائی روشنی*[۱]، سعید قاسمیان[۲]
[۱] دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده
یکی از مشکلات عمده بر سر راه استفاده‌ی تجاری از باتری‌های لیتیوم-یون برای مصارف بالای انرژی، مشکلات گرمایی مربوط به این باتری‌ها است. از آن‌جا که در بسیاری از کاربردها، به منظور تولید توان بالاتر، از تعداد زیادی باتری کنار هم استفاده می‌شود، پیش‌بینی عملکرد حرارتی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه، یک سیستم مدیریت حرارت باتری لیتیوم-یون مجهز به لوله حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، قسمتی از یک بسته‌ی باتری که شامل دو باتری و یک لوله حرارتی می‌باشد، انتخاب شده و عملکرد آن به‌صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش‌ها در دماهای مختلف محیط به کمک یک اتاق آزمون ساخته شده که قابلیت کنترل دقیق دما را دارد، انجام شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط، هرچند که دمای سطح باتری افزایش پیدا می‌کند، اما با کاهش مقاومت حرارتی لوله حرارتی ساخته شده، اثر این افزایش دما تا حدودی تعدیل می‌شود و می‌تواند به صورت یک روش فعال عمل کند. علاوه براین، با استفاده از انتقال حرارت اجباری در ناحیه کندانسور، نه تنها می‌توان درجه حرارت سطح باتری را کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد کنترل کرد، بلکه باعث توزیع یکنواخت دما روی سطح باتری می‌شود. همچنین استفاده از لوله حرارتی کمک می‌کند در سیکل‌های متوالی باتری، شرایط دمایی پایدارتر با نوسان دمایی پایین‌تر فرآهم شود.

کلیدواژه‌ها: باتری لیتیوم-یون، لوله‌ی حرارتی، سیستم مدیریت حرارتی، مدار معادل باتری، مقاومت حرارتی.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸
*نویسنده مسئول: mshafaee@ut.ac.ir

۱- مقدمه
در سال‌های اخیر، باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل مزایای قابل توجهی که دارند، از جمله سرعت نسبتاً پایین خود تخلیه، عمر چرخه‌ی طولانی و همچنین قدرت و چگالی انرژی زیاد، به‌عنوان یک منبع مهم توان برای وسایل نقلیه‌ی الکتریکی، شبکه‌های برق و مخازن انرژی خورشیدی محسوب می‌شوند[1]. به منظور دستیابی به توان و انرژی بالا در کاربردهای با مقیاس بزرگ، به‌خصوص وسایل نقلیه الکتریکی، تعداد زیادی از باتری‌های لیتیوم-یون با ظرفیت‌های بالا به‌صورت سری و یا موازی در کنار هم قرار می‌گیرند تا توان کافی تأمین شود. با این حال، عملکرد، طول عمر و ایمنی باتری‌های لیتیوم-یون بسیار حساس به درجه حرارت است و گرمای تولید شده، باعث ایجاد خطر افزایش بیش از حد دما در مجموعه‌ی باتری‌ها می‌شود. در اکثر موارد، دو مشکل اصلی برای باتری‌ها در حوزه‌ی دما وجود دارد. اول، درجه حرارت بالا به هنگام شارژ و تخلیه که باعث می‌شود دما از سطح مجاز فراتر رود و عملکرد باتری کاهش یابد، دمای بسیار بالا حتی ممکن است به فرار حرارتی منجر شود[2]. دوم، توزیع نامتعادل دما در بسته باتری که منجر به آسیب محلی می‌شود. در حالت ایده‌آل، باتری‌ها باید در محدوده‌ی دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد عمل کنند و اختلاف دما در یک باتری کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شود[3]. این شرایط برای عملکرد و عمر باتری مطلوب است. بنابراین، یک سیستم مدیریت حرارتی باتری به منظور حفظ محدوده‌ی دمای مناسب و همچنین کاهش گرادیان دمای این باتری‌ها برای جلوگیری از عوارض جانبی، لازم است.

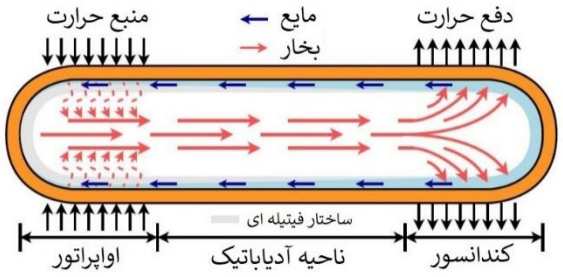
تاکنون روش‌های مختلف خنک‌کاری برای مدیریت حرارت باتری لیتیوم-یون پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، خنک‌کاری بر پایه‌ی هوا می‌باشد. در سال‌های گذشته، مطالعات تجربی و تئوری زیادی ([4,5]) برای بهبود عملکرد خنک‌کاری از طریق هوا انجام شده است. خنک‌کاری اجباری هوا می‌تواند افزایش دما را کاهش دهد. با این حال، در شرایط استرس‌زا، به‌ویژه در نرخ شارژ و تخلیه‌ی بالا و یا دمای بالای محیط، خنک‌کاری از طریق هوا به دلیل ظرفیت حرارتی پایین هوا ناکارآمد است[6]. یک روش دیگر خنک‌کاری باتری، خنک‌کاری از طریق مایع است. این نوع خنک‌کاری را می‌توان به‌روش‌های مختلفی انجام داد، مانند استفاده از لوله‌های مجزا در اطراف هر باتری، غوطه‌ور کردن باتری‌ها در سیال دی‌الکتریک به‌منظور جلوگیری از اتصال کوتاه الکتریکی یا قرار دادن ماژول‌ها در صفحات گرم یا سرد مایع ([7,8]). با توجه به ظرفیت حرارتی و ضریب انتقال حرارت همرفت بالاتر آب نسبت به هوا، مدیریت حرارت باتری از طریق مایع می‌تواند بهتر باشد اما پیچیدگی آن نیز بیشتر است. در سیستم خنک‌کاری مایع، روش آب‌بندی برای جلوگیری از نشت مایع اهمیت دارد. به‌طور کلی، روش‌های خنک‌کاری فعال، مانند خنک‌کاری اجباری هوا و مایع، پیچیدگی و هزینه‌ی مدیریت حرارت باتری را با توجه به لزوم استفاده از دمنده، پمپ‌ها، فن‌ها و سایر لوازم جانبی افزایش می‌دهد[9]. بنابراین استفاده از یک روش خنک‌کاری منفعل برای نگهداری باتری در دمای بهینه مناسب‌تر است.

یک روش دیگر برای مدیریت حرارت باتری، استفاده از ماده‌ی تغییر فازدهنده است که می‌تواند در طول فرآیند ذوب یا انجماد، حرارت فراوانی را جذب یا آزاد کند. در نتیجه این نوع از مدیریت حرارت باتری در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است چراکه در مقایسه با خنک‌کاری از طریق هوا یا مایع در شرایط عملکردی یکسان، توزیع دمای یکنواخت‌تری را بر روی سطح باتری فراهم می‌کند[10]. با این حال، مدیریت حرارتی باتری از طریق ماده‌ی تغییر فازدهنده دارای محدودیت حرارتی است. اگر ماده‌ی تغییر فازدهنده به‌صورت کامل ذوب شود، یک مقاومت حرارت اضافی بین سیال خنک‌کننده و باتری‌ها ایجاد خواهد شد که منجر به وضعیتی بدتر از خنک‌کاری مستقیم با هوا می‌شود[9]. علاوه براین، زمانی‌که پیش‌گرمایش باتری در محیط‌های سرد اتفاق بیفتد، هدایت حرارتی ضعیف باعث مشکلاتی می‌شود و اگر باتری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

از خارج گرم شود، گرادیان حرارتی در طول سلول‌ها قابل توجه خواهد بود[11]. از همه مهمتر، افزایش حجم پس از ذوب نیز اجتناب‌ناپذیر است، در نتیجه فاصله‌ی حجمی اضافی بین سلول‌های باتری کاملاً موردنیاز است و طراحی باید به‌گونه‌ای انجام شود که از نشت مایع تغییر فازدهنده جلوگیری شود. بنابراین استفاده از ماده‌ی تغییر فازدهنده برای مدیریت حرارت بسته‌های باتری مناسب است که برای لحظات کوتاهی جریان بالای الکتریکی را تولید می‌کنند.

روش دیگر مدیریت حرارت باتری، لوله‌های حرارتی است که بر اساس اصل تغییر فاز گاز-مایع استوار است و در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند[12]. با توجه به شکل ۱، در طول فرآیند خنک‌کاری، گرمای سلول باتری از طریق انتقال حرارت رسانایی از دیواره‌ی لوله حرارتی عبور می‌کند و وارد دیواره‌ی اصلی لوله‌ی حرارتی می‌شود. این گرما باعث تبخیر مایع درون ناحیه فیتیله‌ای می‌شود. با توجه به شکل، بخار تولید شده در اثر اختلاف فشار نسبی که به‌واسطه‌ی اختلاف جزئی دما بین دو سر لوله ایجاد می‌شود، به سمت بخش خنک‌کننده حرکت می‌کند و در قسمت کندانسور، گرما از طریق انتقال حرارت اجباری دفع می‌شود. میعانات تولید شده درون لوله حرارتی به کمک نیروی مویینگی ناشی از وجود فیتیله به سمت اواپراتور باز می‌گردد.



شکل ۱) شماتیک عملکرد لوله حرارتی

لوله حرارتی دارای ظرفیت انتقال گرما بر واحد سطح بالایی است، چراکه عملکرد آن براساس تغییر فاز سیال عامل می‌باشد. همچنین ابعاد یک لوله حرارتی نسبتاً کوچک و سبک وزن است، به مقدار کمی از سیال عامل نیاز دارد و احتیاجی به پمپ یا کمپرسور برای گردش آن نیست. همچنین لوله حرارتی می‌تواند متناسب با فضای موجود به اشکال مختلف ساخته شود و در طول کارکردش هیچ نیازی به تعمیر و نگهداری ندارد[13]. با توجه به این ویژگی‌های جذاب، لوله حرارتی گزینه‌ی بسیار مناسبی برای خنک‌کاری باتری است. تران و همکارانش[14] از یک لوله‌ی حرارتی صاف برای خنک‌کاری باتری لیتیم-یون استفاده کردند و در دو حالت همرفت طبیعی و اجباری، توانستند عملکرد حرارتی را در موقعیت‌های مختلف لوله‌ی حرارتی بررسی نمایند. آن‌ها دریافتند که استفاده از لوله حرارتی می‌تواند مقاومت حرارتی را نسبت به یک هیت سینک معمولی، در حالت همرفت طبیعی تا ۳۰ درصد کاهش دهد. یی و همکارانش[15] موفق شدند یک سیستم مدیریت حرارت باتری به کمک لوله حرارتی را از طریق پیشنهاد روش‌های خنک‌کاری مختلف با هوا در ناحیه کندانسور توسعه دهند. ژائو و همکارانش[16] یک سیستم مدیریت حرارت باتری با استفاده از لوله حرارتی بسیار نازک طراحی کردند و برای خنک‌کاری انتهای لوله حرارتی روش‌های همرفت طبیعی، همرفت اجباری عمودی، همرفت اجباری افقی، خنک‌کاری با حمام آب و خنک‌کاری با اسپری آب را پیشنهاد دادند. نتایج تحقیقات او نشان داد که خنک‌کاری با اسپری آب از میان روش‌های دیگر بهینه‌تر است.

وو و همکارانش[17] استفاده از لوله‌های حرارتی همراه با پره‌های آلومینیومی را برای خنک‌کاری یک باتری لیتیم-یون در مقیاس بزرگ پیشنهاد داد، اما او در آزمایش‌های خود مشاهده کرد که اگر از هیچ فن خنک‌کننده‌ای در بخش کندانسور استفاده نکند، در دفع حرارت از مرکز باتری با مشکل مواجه می‌شود. او مطالعاتش را با لوله‌های حرارتی معمولی با سطح مقطع دایره‌ای انجام داد. در این شرایط، منطقه انتقال حرارت مؤثر، نوعی "تماس خط" بین ناحیه‌ی اواپراتور لوله حرارتی و سطح باتری است که منجر به توزیع دمای نامطلوب در سطح باتری می‌شود[18]. در نتیجه بهتر است به‌جای لوله حرارتی استوانه‌ای از لوله حرارتی تخت برای خنک‌کاری باتری استفاده شود. پارک و همکارانش[12] توانستند بهینه‌سازی عددی را برای یک لوله‌ی حرارتی انجام دهند که به‌منظور خنک‌کاری باتری‌های لیتیم-یون موجود بر روی یک هواپیمای نظامی به‌کار می‌رفت. بربان و همکارانش[19] آزمایش‌هایی بر روی یک لوله‌ی حرارتی همراه با مبدل حرارتی هوا انجام دادند که برای خنک‌کاری دستگاه‌های الکتریکی در خودروهای هیبریدی مورد استفاده قرار می‌گرفت. پارامترهایی که در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند، عبارتند از: حالت پایدار و عملکرد گذرا، سیال‌های مختلف برای لوله‌های حرارتی متفاوت، شیب‌ها و سرعت‌های مختلف هوا. آخرین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت حرارت باتری از طریق لوله‌ی حرارتی در جدول ۱ خلاصه شده است.

با وجود مطالعات تجربی متعددی که درخصوص مدیریت حرارتی باتری از طریق لوله حرارتی انجام شده، به ندرت آزمایش جامعی برای شرایط مختلف عملکردی باتری ارائه شده است. از آن‌جا که باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی باید توانایی کار کردن در شرایط مختلف دمایی زمستان و تابستان را داشته باشند، بررسی تأثیر دمای محیط بر عملکرد باتری از اهمیت بالایی برخوردار است و در حال حاضر مقاله‌ای یافت نشد که به بررسی بازه‌ی گسترده‌ی دمای محیط (از ۶۰+ درجه (شرایط دمایی تابستان) تا ۱۰- درجه (شرایط دمایی زمستان)) پرداخته باشد. از این‌رو در این مطالعه یک اتاق آزمون متناسب با شرایط تست خنک‌کاری باتری و بررسی تجربی عملکرد حرارتی مجموعه‌ی خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون به کمک لوله حرارتی ساخته شده است. این بررسی برای خنک‌کاری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

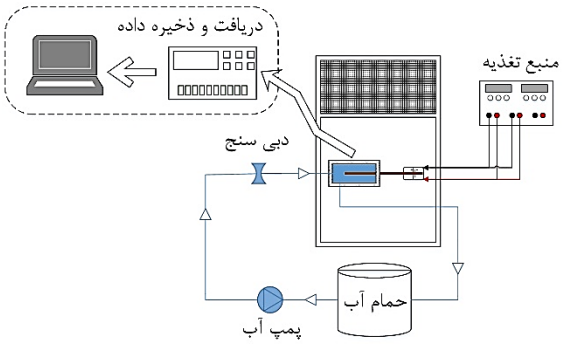
جدول ۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت حرارت باتری لیتیوم-یون با استفاده از لوله حرارتی

نوع لوله حرارتی	روش تحقیق	منبع حرارت	منبع خنک‌کاری	بسته باتری	متغیرها	نویسنده
لوله حرارتی مسطح بسیار نازک	تجربی	بسته باتری	همرفت طبیعی همرفت اجباری حمام آب	4S1P 3Ah 4S1P 8 Ah باتری‌های کیفی	زاویه لوله حرارتی منبع خنک‌کاری فرکانس اسپری	ژاوو و همکارانش [16]
لوله حرارتی مسطح	تجربی	گرم‌کن الکتریکی	همرفت طبیعی همرفت اجباری	---	سرعت باد سینک حرارتی در مقابل لوله حرارتی	تران و همکارانش [14]
---	تجربی شبیه‌سازی	یک سلول	همرفت طبیعی همرفت اجباری	باتری استوانه‌ای ۱۲ آمپرساعت	همرفت طبیعی در مقابل لوله حرارتی	وو و همکارانش [17]
لوله حرارتی با انتهای صاف خنک‌کننده	تجربی	گرم‌کن الکتریکی	حمام ترموستات	---	توان گرم‌کن زاویه لوله حرارتی	راوو و همکارانش [20]
لوله حرارتی نوسانی	تجربی	گرم‌کن الکتریکی	حمام ترموستات	---	توان گرم‌کن زاویه لوله حرارتی	راوو و همکارانش [21]
لوله حرارتی	تجربی	گرم‌کن الکتریکی	آدیاباتیک همرفت اجباری	---	سطح ورودی فن جهت جریان هوا زاویه لوله حرارتی توان گرم‌کن	تران و همکارانش [22]
لوله حرارتی با انتهای صاف خنک‌کننده	تجربی	مخزن باتری شبیه-سازی شده	مخزن مایع	---	توان گرم‌کن دمای تماس	ونگ و همکارانش [23]
لوله حرارتی نوسانی	تجربی	گرم‌کن‌های کارتریجی	هدایت اجباری	---	توان گرم‌کن سیال کاری سرعت و دمای هوا زاویه‌ی لوله حرارتی	بربان و همکارانش [24]
لوله حرارتی	تحلیلی و عددی شبیه سازی	منبع حرارتی ثابت	دمای ثابت هدایت اجباری	معادل باتری ۲۰ آمپرساعت در نرخ تخلیه ۱۰۰ آمپری	مدل شبیه‌سازی روش خنک‌کاری	گریکو و همکارانش [25]

باتری در دماهای مختلف محیط، شرایط مختلف خنک‌کاری ناحیه کندانسور و همچنین شرایط سیکل متوالی باتری انجام شده است. برای این منظور دو باتری لیتیوم-یون به همراه یک لوله حرارتی درون یک اتاق تست در نظر گرفته شده است که امکان بررسی شرایط دقیق عملکردی وجود دارد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر پارامترهای مؤثر در شرایط عملکردی باتری لیتیوم-یون و همچنین لزوم استفاده از لوله حرارتی برای مدیریت حرارت باتری می‌باشد.

۱- چیدمان تجربی

شکل ۲ شماتیک مدار آزمون سیستم مدیریت حرارتی باتری لیتیوم-یون با استفاده از لوله حرارتی را برای ارزیابی تجربی نشان می‌دهد. این دستگاه تست شامل یک محفظه آزمایش با قابلیت کنترل دمای دلخواه، منبع تغذیه ولتاژ متغیر، منبع تغذیه ولتاژ ثابت، دو عدد باتری لیتیوم-یون، یک لوله حرارتی مستقیم و تخت، دو صفحه آلومینیومی واسط، مقاومت برای تخلیه باتری و



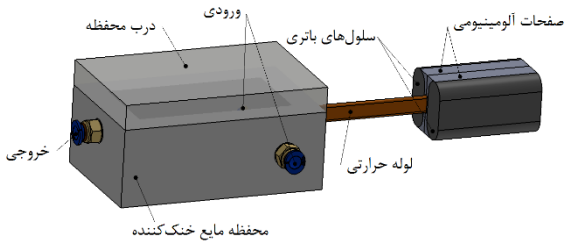
شکل ۲) شماتیک مدار آزمون

سیستم داده‌برداری شامل ترموکوپل‌ها، آمپرمترها، ولت‌مترها و دبی‌سنج است.

در این تحقیق از دو باتری لیتیوم-یون با ابعاد کلی ۶۵×۳۸×۱۸ میلی‌متر استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. یک لوله حرارتی مستقیم (سینتر شده مسی-آب، کاملاً تخت ۲۵×۱۱×۳ میلی‌متر) داخل گپ سلول باتری قرار می‌گیرد،

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

به‌گونه‌ای که ناحیه‌ی اواپراتور لوله حرارتی برای توزیع دمای بهتر در کل سطح باتری با دو صفحه‌ی آلومینیومی در تماس است. ناحیه‌ی کندانسور لوله حرارتی درون یک محفظه مایع (۱۰۰×۵۰×۳۵ میلی‌متر) قرار می‌گیرد که با توجه به استفاده از دبی‌سنج، پمپ آب می‌تواند دبی‌های جرمی مختلف را تولید کند تا امکان شبیه‌سازی شرایط مختلف خنک‌کاری باتری فراهم شود. مفهوم مدل بسته‌ی باتری در شکل ۳ نشان داده شده است.

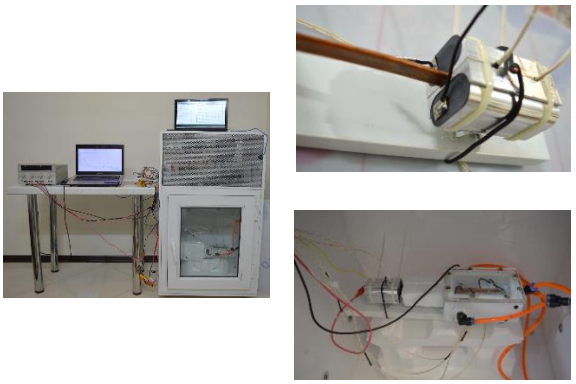


شکل ۳) مفهوم سیستم مدیریت حرارت باتری با استفاده از لوله حرارتی

جدول ۲) مشخصه‌های سلول باتری لیتیوم-یون

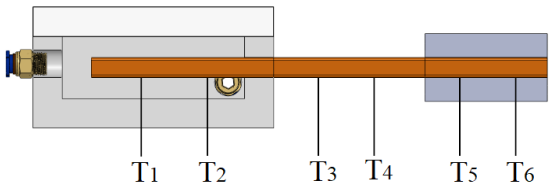
جنس الکترولیت	LiPF6, EC+EMC+PC
جنس سلول	آلومینیوم
حجم، Liter	۰/۰۴
وزن هر سلول، gr	۹۰
ولتاژ نامی، V	۳/۷
ظرفیت نامی، Ah	۴/۴
مقاومت داخلی (Rt)، mΩ	< ۸
حداقل ولتاژ تخلیه، V	۲
حداکثر ولتاژ تخلیه، V	۴/۲
دمای عملکرد قابل قبول، ℃	۴۰- تا ۸۵
دمای شارژ توصیه شده، ℃	۲۰ - ۴۵
تعداد سیکل‌های باتری	بیش از ۸۰۰۰ سیکل

از آن‌جا که در این تحقیق سعی شده است، عملکرد باتری در شرایط دمایی گسترده بررسی شود، از یک محفظه آزمایش با قابلیت کنترل و تنظیم دما استفاده شده است. این محفظه از نظر انتقال حرارت نسبت به محیط اطراف عایق شده است. در شکل ۴ چیدمان آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۴) تجهیزات آزمایشگاهی برای تست مجموعه خنک‌کاری باتری با استفاده از لوله حرارتی

پارامترهای اندازه‌گیری سیستم شامل ولتاژ و جریان باتری‌های لیتیوم-یون، دمای سطح باتری، دمای شش نقطه مختلف لوله حرارتی، دمای ورودی‌ها و خروجی از محفظه‌ی مایع و همچنین دبی جرمی تخلیه‌ی سیال خنک‌کننده می‌باشد. فرکانس داده‌برداری ۰/۵ هرتز می‌باشد. دمای سطوح باتری می‌تواند به کمک ترموکوپل‌هایی که در شیار صفحات آلومینیومی تعبیه شده است، اندازه‌گیری شوند. نحوه‌ی نصب ترموکوپل‌های روی لوله حرارتی در شکل ۵ نشان داده شده است. داده‌برداری شامل ثبت لحظه‌ای دما، جریان و ولتاژ از طریق ابزاهای دقیق اندازه‌گیری صورت گرفته است. برای این منظور، ۱۰ عدد ترموکوپل دما نوع K به همراه ماژول مبدل MAX6675 استفاده شده است که دارای رزولوشن تبدیل ۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. علاوه براین، دو عدد سنسور اندازه‌گیری جریان و ولتاژ (برای هر باتری به‌صورت جداگانه) و دو میکروکنترلر استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جریان از ماژول ACS712 با خطای حداکثری ۱/۵ درصد و برای اندازه‌گیری ولتاژ از ماژول اندازه‌گیری ولتاژ DC با رزولوشن ولتاژ آنالوگ ۰/۰۰۴۸۹ ولت استفاده شده است. همچنین میکروکنترلر از نوع برد آردوینو Mega 2560 است که مستقیماً به کامپیوتر وصل شده و از طریق نرم‌افزار، مقادیر دما، جریان و ولتاژ به‌صورت لحظه‌ای ثبت می‌شوند.



شکل ۵) ترتیب نصب ترموکوپل‌ها بر روی لوله حرارتی مستقیم (نمای برش خورده)

۲- مدار معادل باتری

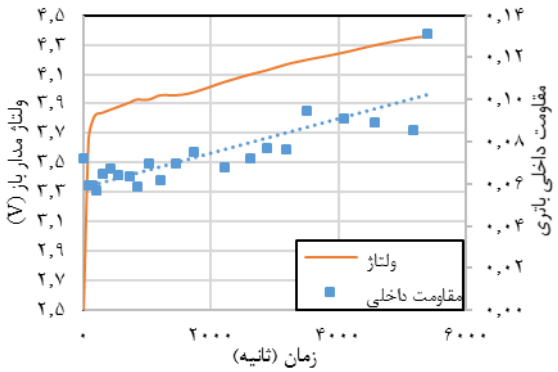
در بررسی فرآیند شارژ و تخلیه‌ی باتری، پارامتری که نشان‌دهنده‌ی پتانسیل باتری است، ولتاژ مدار باز می‌باشد. برای اندازه‌گیری این ولتاژ، لازم است به هنگام شارژ و تخلیه، به‌صورت مقطعی جریان قطع شود و پس از پایدار شدن سطح ولتاژ در تمام لایه‌های باتری، این ولتاژ به عنوان پتانسیل باتری ثبت شود. از آن‌جا که تست تجربی در چند سیکل متوالی باتری و بدون توقف انجام می‌شود، لازم است که مدار معادلی برای فرآیند شارژ و تخلیه استخراج شود که بتوان به کمک این مدار، وضعیت پتانسیل باتری را به‌دست آورد. مدل مدار معادل یک ساختار ساده‌ای برای به‌دست آوردن ورودی/خروجی باتری دارد. این مدل از اجزای الکتریکی معمولی مانند مقاومت‌ها، خازن‌ها و منابع ولتاژ به‌شکل یک شبکه‌ی مدار استفاده می‌کند[26]. یکی از مدل‌های مدار معادل معمولی که برای باتری‌های وسایل نقلیه به‌کار برده می‌شوند، مدل رینت (یا مدل مقاومت داخلی) می‌باشد ([26,27]). در مدل رینت، فرض می‌شود

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

که باتری یک منبع ولتاژ ایده‌آل است که در مدار به‌صورت سری با مقاومت‌ها قرار می‌گیرد و مطابق معادله (۱) نوشته می‌شود[27]. در این معادله، V_L ولتاژ ترمینال، V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_L جریان بار (+ تخلیه، - شارژ) و R مقاومت داخلی باتری است.

$$V_L = V_{oc} - I_L \times R \qquad (۱)$$

برای باتری تحت تست، در دماهای مختلف محیط و شرایطی که دمای روی سطح باتری ثابت نگه داشته شده است، برای دو حالت شارژ و تخلیه، مقدار مقاومت معادل باتری به‌صورت تابعی از حالت شارژ (SOC) و دما و از طریق میان‌یابی به‌دست آمده است. همان‌گونه که اشاره گردید، به هنگام تست، به‌صورت مقطعی جریان در طول فرایند شارژ و تخلیه قطع شد و پس از پایدار شدن پتانسیل تمام سلول‌های باتری، مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده است. به این ترتیب در تست‌های تجربی، با ثبت لحظه‌ای ولتاژ دو سر باتری و جریان عبوری و براساس معادله مدل رینت، پتانسیل داخل باتری مشخص می‌شود. در شکل ٦نمونه‌ای از تغییرات ولتاژ مدار باز برای به‌دست آوردن مقاومت داخلی باتری موردنظر در دمای محیط ١٤/٥ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.



شکل ۶) محاسبه مقاومت داخلی باتری (دمای محیط ١٤/٥ درجه سانتی‌گراد)

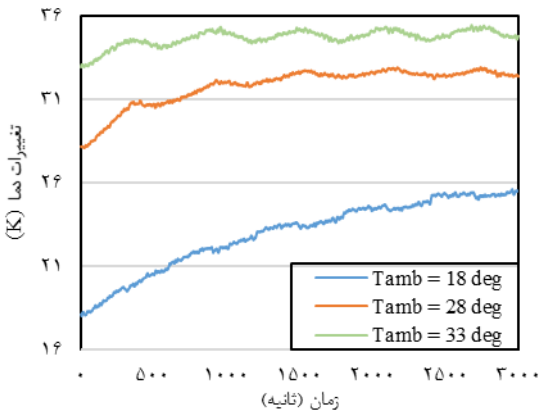
۳- نتایج و بحث‌ها

به منظور انجام آزمون‌های تجربی، دو باتری لیتیوم-یون در محل اواپراتور لوله حرارتی قرار می‌گیرند. برای استقرار بهتر لوله حرارتی بین دو باتری از صفحات واسط آلومینیوم با حداقل ضخامت استفاده شده است. به‌منظور کاهش مقاومت حرارتی، بین تمام قطعات یک لایه نازک خمیر سیلیکون قرار داده می‌شود تا گرما به‌خوبی منتقل شود. پس از آماده‌سازی مجموعه و نصب ترموکوپل‌ها و اتصالات آب خنک‌کاری، داخل اتاق آزمون قرار داده می‌شود تا آزمون‌های مختلف انجام شود.

شارژ باتری با استفاده از منبع تغذیه DC و تخلیه باتری به کمک مقاومت انجام می‌شود و برای هر سیکل، ٦٠٠ ثانیه درنظر گرفته شده است (هر کدام از مراحل شارژ و تخلیه به مدت ٣٠٠ ثانیه می‌باشد). این فرآیند به کمک میکروکنترلر و بدون توقف کنترل می‌شود و در طول آزمایش، تمام پارامترهای اندازه‌گیری ثبت و ذخیره می‌شوند. هدف اصلی از انجام آزمون بررسی برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی باتری است و انتخاب مقدار هر یک از این پارامترها براساس شرایط کارکرد باتری می‌باشد.

۳-۱- تأثیر دمای محیط

همان‌گونه که اشاره گردید یکی از اهداف این مقاله، بررسی عملکرد باتری به کمک لوله حرارتی ساخته شده در دماهای مختلف محیط است. زمانی‌که از باتری به عنوان منبع انرژی در خودروهای الکتریکی استفاده می‌شود، راندمان حرارتی آن در شرایط دمایی زمستان و تابستان متفاوت است. از اینرو با استفاده از اتاق تست (با قابلیت تنظیم و کنترل دما)، سیستم مدیریت حرارتی باتری موردنظر در دماهای مختلف محیط بررسی گردید. شکل ۷ متوسط دمای سطح باتری در تماس با لوله حرارتی در دماهای ۱۸، ۲۸ و ۳۳ درجه را نشان می‌دهد. دو باتری به‌صورت متوالی تا پنج سیکل با ظرفیت 1C شارژ و تخلیه می‌شوند. ناحیه کندانسور نیز به کمک آب با دمای ثابت ۲۲ درجه سانتی‌گراد خنک می‌شود.



شکل ۷) تغییرات دمای سطح باتری در دماهای مختلف محیط

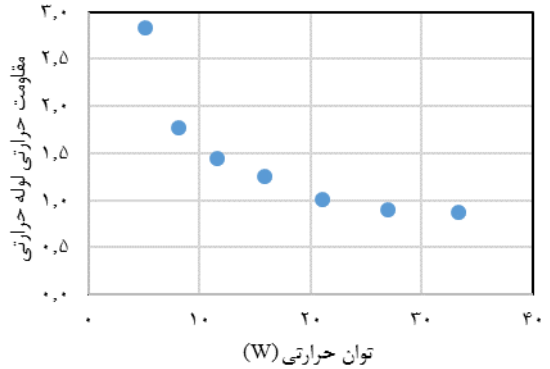
مشاهده می‌شود که عملکرد لوله حرارتی برای خنک‌کاری باتری در دمای ۳۳ بهتر از دو دمای دیگر است. چراکه کمترین افزایش دمای سطح باتری در این دما رخ داده است. افزایش دمای متوسط سطح باتری در دمای محیط ۳۳، ۲۸ و ۱۸ درجه، به‌ترتیب برابر ۲، ۵ و ۸ درجه است.

مقاومت حرارتی مطلق در حقیقت معرف اختلاف دمایی است که در اثر جریان واحد انرژی گرمایی در واحد زمان به‌وجود می‌آید و مطابق معادله‌ی (2) بیان می‌شود [28].

$$R_{th} = \frac{T_{eva,avg} - T_{con,avg}}{Q_{in}} \qquad (2)$$

هرچند که در دماهای بالاتر، گرمای تولید شده توسط باتری مضاعف می‌شود، اما برای لوله حرارتی ساخته شده، مقدار مقاومت حرارتی معادل لوله حرارتی کاهش می‌یابد (مطابقشکل ۸). به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

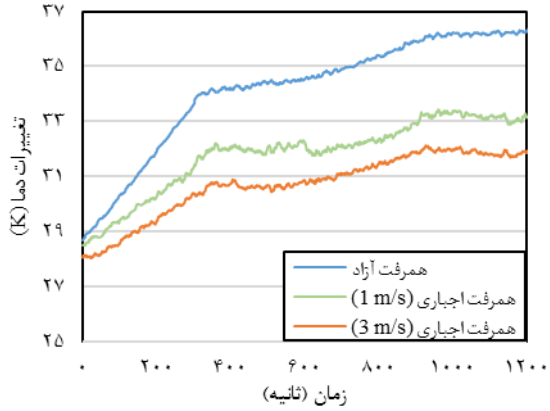


شکل ۸) تغییرات مقاومت حرارتی لوله حرارتی ساخته شده با توان حرارتی

این ترتیب، لوله حرارتی موردنظر در دفع حرارت در توان‌های بالاتر موفق‌تر عمل می‌کند (توان حرارتی در این نمودار همان توان منبع تغذیه برای شارژ باتری می‌باشد). البته این موضوع مزیت استفاده از لوله حرارتی را به عنوان یکی از روش‌های مدیریت حرارتی باتری نشان می‌دهد. نکته‌ی مهم دیگر کنترل دمای سطح باتری در بازه‌ی مطلوب ۲۰ تا ۴۰ درجه است که بهترین رنج عملکردی باتری لیتیوم-یون می‌باشد[3].

۳-۲- تأثیر همرفت اجباری

یکی از عوامل مؤثر در عملکرد لوله حرارتی و در نتیجه عملکرد خنک‌کاری باتری، نوع خنک‌کاری ناحیه‌ی کندانسور لوله حرارتی است. شکل ۹ متوسط تغییرات دمای باتری را برای دو سیکل متوالی شارژ و تخلیه با ظرفیت 1C نشان می‌دهد که ناحیه کندانسور تحت شرایط جریان طبیعی و همرفت اجباری با دو سرعت متفاوت ۱ m/s و ۳ m/s از طریق سیال آب قرار دارد. مشاهده می‌شود که دمای باتری تحت جریان طبیعی بیشتر است و پس از طی دو سیکل دمای باتری همچنان درحال افزایش است، در حالی‌که با خنک‌کاری اجباری، نه تنها متوسط دمای باتری کمتر است، بلکه پس از دو سیکل نرخ افزایش دما کاهش یافته است.



شکل ۹) تغییرات دمای باتری تحت شرایط مختلف خنک‌کاری ناحیه کندانسور

علاوه بر این، دمای باتری با افزایش سرعت جریان آب کاهش می‌یابد و می‌تواند در کمتر از ۴۰ درجه سانتیگراد کنترل شود. بنابراین، ترکیب بخش کندانسور با همرفت اجباری، قابلیت انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد و دمای باتری کاهش می‌یابد.

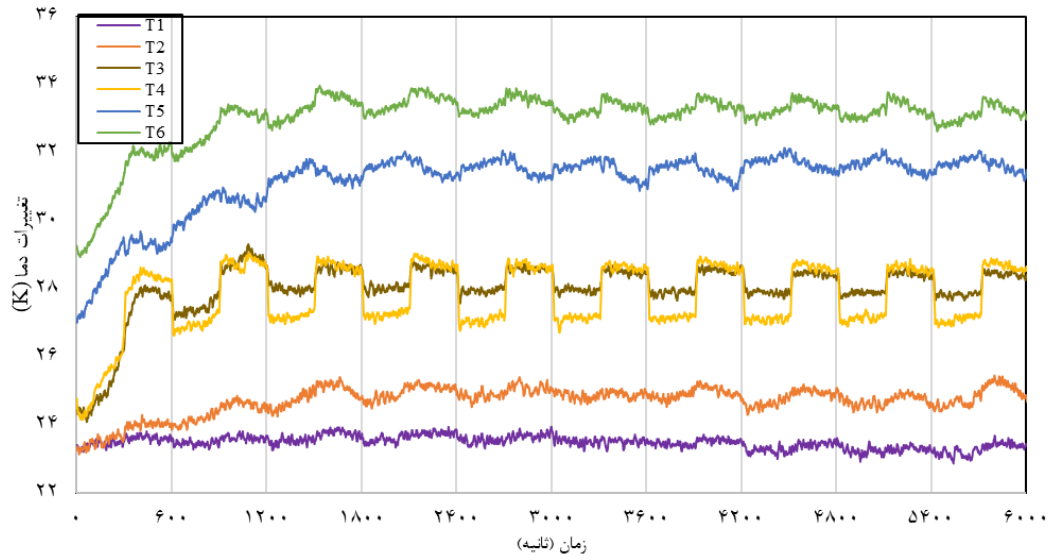
۳-۳- آزمایش سیکل و توزیع دما

در شرایط واقعی استفاده از باتری به عنوان منبع انرژی خودروهای الکتریکی، پروفیل‌های توان باتری همواره فعال است و باتری به صورت متوالی شارژ و تخلیه می‌شود. برای بررسی بیشتر عملکرد حرارتی مدیریت حرارت باتری به کمک لوله حرارتی در کاربرد عملی، شرایط سیکل‌های متوالی به‌صورت تجربی بررسی شده است. در شکل ۱۰ منحنی دمای ۶ ترموکوپل نصب شده مطابق شکل ۵ نشان داده شده است. باتری‌ها در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برای ده سیکل به‌صورت مداوم شارژ و تخلیه گردیدند. نرخ‌های شارژ و تخلیه هر دو برابر 1C است. هر سیکل به مدت ۶۰۰ ثانیه انجام شد و تلاش گردید که در طول تست سطح جریان تقریباً ثابت باقی بماند. همچنین دمای سیال خنک‌کننده در ناحیه کندانسور، مقدار ۲۲ درجه سانتی‌گراد به‌صورت ثابت حفظ شده است.

نکته‌ی قابل توجه در شکل ۱۰ ترتیب دمای ترموکوپل‌های نصب شده بر روی لوله حرارتی است. همان‌گونه که انتظار می‌رود دمای ناحیه اواپراتور تحت تأثیر سیکل‌های باتری رفتار می‌کند. اما نحوه رفتار ترموکوپل T3 و T4 با زمان قابل توجه است که به صورت پله‌ای در هر نیم سیکل شارژ یا تخلیه، مقدار آن تغییر می‌کند. این دو ترموکوپل در ناحیه آدیاباتیک لوله حرارتی نصب شده‌اند. البته مقدار دمای این دو ترموکوپل هم نسبت به یکدیگر به هنگام شارژ و تخلیه تغییر می‌کند که این رفتار به‌واسطه قرار گرفتن بین دو ناحیه اواپراتور و کندانسور رخ می‌دهد. در حین تست ناحیه آدیاباتیک کاملاً عایق شده است.

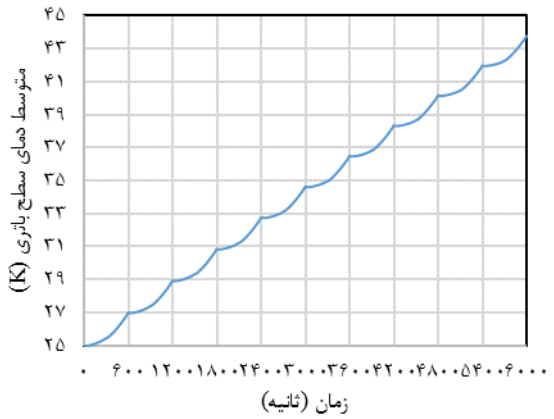
همان‌گونه که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود افزایش دمای سطحی از باتری که در تماس با لوله حرارتی است تنها تا سیکل سوم ادامه دارد و از سیکل چهارم، متوسط دمای سطح باتری از ۳۴ درجه فراتر نمی‌رود و روند تغییرات آن ثابت است. یعنی استفاده از لوله‌های حرارتی از نظر کارکرد متوالی باتری‌های لیتیوم-یون مؤثر هستند. در حالی‌که اگر باتری بدون سیستم مدیریت حرارت باتری به‌صورت مداوم شارژ و تخلیه شود، دمای روی سطح آن به‌شدت افزایش می‌یابد و منجر به خرابی باتری می‌شود. گواه این مطلب منحنی شکل ۱۱ است که متوسط دمای سطح یک باتری که در تماس با لوله حرارتی نمی‌باشد را نشان می‌دهد. به این ترتیب که یک باتری تنها در معرض جابه‌جایی آزاد قرار دارد و ده سیکل به صورت متوالی شارژ و تخلیه می‌شود (هر سیکل ۶۰۰ ثانیه). با توجه به شکل، دمای متوسط سطح باتری به‌صورت مداوم افزایش می‌یابد که با توجه به ساختار باتری و خطر انفجار در دمای بالا، لازم است

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]



شکل ۱۰) توزیع دمای لوله حرارتی پس از سیکل‌های متوالی

درصورت استفاده‌ی مداوم از باتری، از یک روش خنک‌کاری در هر دو طرف باتری استفاده شود. اهمیت این موضوع به‌خصوص زمانی‌که بسته‌ی باتری به‌کار برده می‌شود و یا بیشتر از ظرفیت نامی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بیشتر است.



شکل ۱۱) افزایش دمای سطح باتری بدون لوله حرارتی

۴- جمع‌بندی

دمای باتری یک عامل مهم است که می‌تواند توان خروجی، راندمان حرارتی و عمر مفید باتری‌های لیتیوم-یون را تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بهبود عملکرد و کاهش هزینه، لازم است باتری در محدوده‌ی دمای مطلوب با حداکثر توزیع یکنواخت کار کند. در این مقاله به‌منظور بهبود عملکرد حرارتی در شرایط عملکردی مختلف به خصوص در دمای محیط مختلف، یک سیستم مدیریت حرارت باتری مبتنی بر لوله حرارتی معرفی شده است. با توجه به تست‌های انجام شده، جمع‌بندی زیر را می‌توان انجام داد:

دمای محیط یک عامل تأثیرگذار در عملکرد حرارتی باتری لیتیوم-یون است و نه‌تنها در دمای سطح باتری، بلکه در توزیع یکنواخت دما هم اثر می‌گذارد. کمترین تغییر دمای سطح باتری، نسبت به دمای محیط در دمای بالاتر رخ می‌دهد. افزایش دمای متوسط سطح باتری در دمای محیط ۱۸، ۲۸ و ۳۳ درجه، به‌ترتیب برابر ۸، ۵ و ۲ درجه است. افزایش دمای سطح باتری یک عامل کلیدی است که در مرحله اول باید برای طراحی سیستم مدیریت حرارتی باتری درنظر گرفته شود.

همرفت طبیعی برای خنک‌کاری باتری کافی نیست، درحالی‌که استفاده از لوله حرارتی می‌تواند دمای باتری را کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد نگه دارد. علاوه براین استفاده از لوله حرارتی برای خنک‌کاری باتری، باعث افزایش و نوسان دمای کمتری روی سطح باتری می‌شود. این موضوع برای سیکل‌های متوالی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

انتخاب لوله حرارتی مناسب براساس نرخ تولید گرمای باتری می‌تواند در دماهای بالاتر، مقاومت حرارتی معادل لوله حرارتی را کاهش دهد و این قابلیت استفاده از لوله حرارتی را برای سیستم مدیریت حرارت باتری تاحدودی تبدیل به یک روش فعال می‌کند. این نتایج، تأثیر لوله حرارتی را در کنترل دمای باتری در شرایط پایدار و گذرا نشان می‌دهد. هر چند که افزودن لوله حرارتی، وزن مجموعه را حدود ۱۰ درصد افزایش می‌دهد ولی عملکرد حرارتی را باتری را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌دهد. اهمیت این موضوع در بسته‌ی باتری که برای تولید توان بیشتر، باتری‌ها کنار هم قرار می‌گیرند، برجسته‌تر است.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

1- Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. Applied Energy. 2016; 164:99-114.
2- Wang Q, Jiang B, Li B, Yan Y. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016; 64:106-28.
3- Pesaran AA. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. Journal of power sources. 2002;110(2):377-82.
4- Chen K, Wu W, Yuan F, Chen L, Wang S. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern. Energy. 2019; 167:781-90.
5- 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; 80:55-65.
6- Fathabadi H. High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active–passive thermal management system for using in hybrid/electric vehicles. Energy. 2014; 70:529-38.
7- Pesaran AA. Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. Battery Man. 2001;43(5):34-49.
8- Qian Z, Li Y, Rao Z. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. Energy Conversion and Management. 2016; 126:622-31.
9- Khateeb SA, Farid MM, Selman JR, Al-Hallaj S. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. Journal of Power Sources. 2004;128(2):292-307.
10- Sabbah R, Kizilel R, Selman JR, Al-Hallaj S. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high-power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. Journal of Power Sources. 2008;182(2):630-8.
11- Wu W, Yang X, Zhang G, Chen K, Wang S. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material-based battery thermal management system. Energy Conversion and Management. 2017; 138:486-92.
12- Park Y, Jun S, Kim S, Lee DH. Design optimization of a loop heat pipe to cool a lithium ion battery onboard a military aircraft. Journal of mechanical science and technology. 2010;24(2):609-18.
13- Wu W, Wang S, Wu W, Chen K, Hong S, Lai Y. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. Energy conversion and management. 2019; 182:262-81.
14- Tran TH, Harmand S, Desmet B, Filangi S. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/EV lithium-ion battery. Applied Thermal Engineering. 2014;63(2):551-8.
15- Ye Y, Shi Y, Saw LH, Tay AA. Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal management system for fast charging lithium ion battery packs. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016; 92:893-903.
16- Zhao R, Gu J, Liu J. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries. Journal of power sources. 2015; 273:1089-97.
17- Wu MS, Liu KH, Wang YY, Wan CC. Heat dissipation design for lithium-ion batteries. Journal of power sources. 2002;109(1):160-6.
18- Ye Y, Saw LH, Shi Y, Tay AA. Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. Applied Thermal Engineering. 2015; 86:281-91.
19- Burban G, Ayel V, Alexandre A, Lagonotte P, Bertin Y, Romestant C. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications. Applied thermal engineering. 2013;50(1):94-103.
20- Rao Z, Wang S, Wu M, Lin Z, Li F. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe. Energy Conversion and Management. 2013; 65:92-7.
21- Rao Z, Huo Y, Liu X. Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014; 57:20-6.
22- Tran TH, Harmand S, Sahut B. Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery. Journal of power sources. 2014; 265:262-72.
23- Wang Q, Jiang B, Xue QF, Sun HL, Li B, Zou HM, Yan YY. Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes. Applied Thermal Engineering. 2015; 88:54-60.
24- Burban G, Ayel V, Alexandre A, Lagonotte P, Bertin Y, Romestant C. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications. Applied thermal engineering. 2013;50(1):94-103.
25- Greco A, Cao D, Jiang X, Yang H. A theoretical and computational study of lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using heat pipes. Journal of Power Sources. 2014; 257:344-55.
26- He H, Xiong R, Fan J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. energies. 2011;4(4):582-98.
27- Feng J, He YL, Wang GF. Comparison study of equivalent circuit model of Li-Ion battery for electrical vehicles. Research Journal of Applied Sciences. 2013;6(20):3756-9.
28- Hussain MN, Janajreh I. Numerical simulation of a cylindrical heat pipe and performance study. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering. 2016;12(2):135-41.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.11.6.1]
[DOI: 10.52547/mme.22.11.687]