

Experimental Investigation of Various Methods for Enhancing Thermal Management of Lithium-Ion Batteries Using Liquid-Vapor Phase Change

Majid Goodarzi,¹ Mohammad Javad Noroozi^{2*}

¹Energy and Environment Research Group, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Borujerd, Iran, majid.goodarzi@abru.ac.ir

²Energy and Environment Research Group, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Borujerd, Iran, m.j.noroozi@abru.ac.ir

Keywords:

lithium-ion battery, thermal management, liquid-vapor phase change, hydrogel, immersion, forced convection.

Original Research Article

Paper History:

Received: 27/02/2025

Revise: 04/05/2025

Accepted: 11/05/2025

Abstract: In this study, a novel thermal management method for lithium-ion batteries based on liquid–vapor phase change was investigated. A battery pack, consisting of twelve cylindrical 18650 cells, was placed in a chamber immersed in R-141b refrigerant, and the effects of four key parameters were experimentally evaluated: i.e., refrigerant immersion height (0%, 50%, and 100% of the cell height), discharge rate (from 1C to 4C), cooling method (no cooling, natural convection, and forced convection using a fan), and initial hydrogel temperature (10 °C and 24 °C). The results showed that increasing the immersion height and using hydrogel with a lower initial temperature led to the greatest reductions in both maximum cell temperature and final chamber pressure. At a 4C discharge rate, the maximum cell temperature in the fully immersed condition was 31 °C lower than that in the no-cooling condition. Additionally, using hydrogel reduced the final chamber pressure by up to 44.4%. In the no-cooling condition, the maximum temperature at 4C discharge exceeded 71 °C, which is above the safe operating limit of lithium-ion cells. However, with full immersion, this temperature was reduced to 40 °C. With the use of hydrogel at an initial temperature of 10 °C, it was further reduced to approximately 34.5 °C.

How to cite this article: Goodarzi, M., Noroozi, M.J., "Experimental Investigation of Various Methods for Enhancing Thermal Management of Lithium-Ion Batteries Using Liquid-Vapor Phase Change", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 3, PP. 82-95, 2024, <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.256421.1104>
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

Lithium-ion batteries have gained widespread use in the recent years due to their high energy density, long lifespan, and reliable performance—especially in electric devices. However, one of the main challenges with these

batteries is the heat generated during charging and discharging, which can reduce efficiency, safety, and overall lifespan. This makes the development of effective thermal management systems essential. Battery thermal management systems generally fall into two categories: active and passive. Active cooling involves using

external energy to circulate a cooling fluid, whereas passive cooling relies on natural heat dissipation. One promising approach in this field is liquid-vapor phase change cooling, which effectively regulates battery temperature due to its ability to absorb large amounts of heat at a constant temperature. This study explores the use of this method. Unlike conventional approaches that primarily use solid-liquid phase change materials and active cooling systems, this experimental research introduces a novel liquid-vapor phase change cooling system using R141-b refrigerant. Compared to traditional solid-liquid phase change materials, which suffer from low thermal conductivity over time, this method enables much faster heat transfer. The study examines battery performance under two main conditions: with and without cooling. In the cooling scenario, four key factors were investigated: immersion depth, ambient temperature, forced convection, and the presence of hydrogel.

Materials and methods

Twelve cylindrical lithium-ion 18650 cells were assembled into a battery pack for this study. Given that the refrigerant comes into direct contact with the batteries, a dielectric refrigerant was chosen to prevent electrical hazards. Additionally, a low boiling point was a critical selection criterion. Based on these requirements, 1-dichloro-1-fluoroethane (R-141b) was selected as the refrigerant due to its dielectric properties and a boiling point of 32°C at atmospheric pressure. The battery pack enclosure was made from Teflon, with a machined cavity measuring 82 × 110 mm (length × width) and 85 mm (height). The enclosure walls were 10 mm thick. The batteries were placed inside the cavity, and an aluminum heat sink was mounted on top using ten screws to enhance heat dissipation.

Result

Initial experiments were performed under four discharge rates (1C, 2C, 3C, and 4C) without any cooling system. As expected, battery temperature rose significantly with increased discharge rates, reaching a peak of 73.1°C at 4C, which exceeded the safety threshold. The central cell (cell 2) experienced the highest temperatures due to limited heat dissipation in the core of the pack. The temperature difference between the central and edge cells reached up to 11.6°C under no cooling conditions. The effect of refrigerant immersion depth was studied under three levels:

0% (no immersion), 50% (partial immersion), and 100% (full immersion). At 4C discharge:

Partial immersion reduced the maximum temperature by 25.67°C (36.17%) compared to the no-cooling case. Full immersion reduced the maximum temperature by 31°C (44%), achieving 40°C, which is within safe operating limits. The thermal gradient between cells also improved significantly under full immersion, with a reduction of ΔT to around 2.5°C.

Two additional strategies were tested to enhance heat dissipation through the heat sink:

- Forced convection using a 1.5 m/s airflow had negligible impact on temperature reduction
- Hydrogel insertion between the heat sink fins proved more effective

When hydrogel at 24°C was used, the maximum cell temperature dropped by 8.74%; with hydrogel at 10°C, the temperature reduction reached 13.88% compared to the fully immersed case without hydrogel. Additionally, the final chamber pressure decreased from 1.31 bar to:

- 1.02 bar with hydrogel at 24°C (22.2% reduction)
- 0.73 bar with hydrogel at 10°C (44.4% reduction)

These results confirm the effectiveness of combining refrigerant immersion and high-heat-capacity media like hydrogel in reducing thermal stress and improving battery safety.

Discussion and Conclusion

This study experimentally investigated a novel thermal management method for lithium-ion batteries, based on direct refrigerant cooling using a liquid-vapor phase change system. A test rig was constructed featuring twelve 18650 cylindrical cells immersed in R-141b refrigerant, and the effects of four main parameters—immersion height, discharge rate, hydrogel initial temperature, and cooling method—were comprehensively analyzed. The results clearly demonstrated that full refrigerant immersion drastically reduced the maximum cell temperature by up to 31°C (44%) at 4C discharge. Moreover, using hydrogel at 10°C as a supplemental cooling interface further reduced the maximum temperature by 13.88% and lowered the chamber pressure by 44.4%. Although forced convection alone had minimal impact, the combined effect of immersion and hydrogel provided substantial thermal and pressure regulation while promoting a more uniform temperature distribution and reducing the risk of thermal runaway. This hybrid liquid-

vapor cooling approach, particularly when augmented with high-capacity media like hydrogel, represents a promising, passive, and energy-efficient method for enhancing battery safety, lifespan, and operational stability-

especially under high-discharge conditions. Future research should explore scalability, long-term reliability, and integration in real battery modules under dynamic load scenarios.

بررسی تجربی روش‌های مختلف بهبود مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون با استفاده از تغییر فاز مایع-بخار

مجید گودرزی^۱، محمدجواد نوروزی^{۲*}

^۱ استادیار گروه تحقیقاتی انرژی و محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، majid.goodarzi@abru.ac.ir

^۲ استادیار گروه تحقیقاتی انرژی و محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، m.j.noroozi@abru.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

باتری لیتیوم-یون،

مدیریت حرارتی،

تغییر فاز مایع-بخار، هیدروژل،

غوطه‌وری،

جابه‌جایی اجباری.

چکیده: در این مطالعه، یک روش جدید برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون با استفاده از تغییر فاز مایع-بخار بررسی شده است. یک بسته باتری متشکل از ۱۲ سلول استوانه‌ای ۱۸۶۵۰ در یک محفظه غوطه‌ور در مبرد R-141b قرار داده شد و اثر چهار پارامتر کلیدی شامل ارتفاع غوطه‌وری مبرد (سه ارتفاع ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ارتفاع سلول‌های باتری)، نرخ دشارژ (1C تا 4C)، نوع روش خنک‌کاری (بدون خنک‌کاری، استفاده از جابه‌جایی آزاد و جابه‌جایی اجباری با فن)، و دمای اولیه هیدروژل (۱۰ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد) بر عملکرد حرارتی باتری‌ها به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع غوطه‌وری و استفاده از هیدروژل با دمای اولیه پایین، بیشترین کاهش دما و فشار نهایی محفظه را به همراه داشته است. در شرایط دشارژ 4C، دمای حداکثری سلول‌ها در حالت غوطه‌وری کامل نسبت به حالت بدون خنک‌کاری ۳۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. همچنین، استفاده از هیدروژل فشار نهایی محفظه را تا ۴۴/۴ درصد کاهش داده است. در حالت بدون خنک‌کاری، دمای حداکثری در نرخ دشارژ 4C به بیش از ۷۱ درجه سانتی‌گراد رسید که بالاتر از حد ایمنی عملکرد باتری است. اما با استفاده از غوطه‌وری کامل، این مقدار به ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از هیدروژل با دمای اولیه ۱۰ درجه به حدود ۳۴/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

۱. مقدمه

باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل چگالی انرژی بالا، طول عمر طولانی و عملکرد مطلوب، در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای از جمله در خودروهای الکتریکی یافته‌اند. با این حال، تولید حرارت در فرایندهای شارژ و دشارژ این باتری‌ها، مشکلاتی نظیر کاهش بازدهی، ایمنی و عمر مفید را به همراه دارد. از این رو، توسعه سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری‌ها ضروری است. سیستم‌های مدیریت حرارتی به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در روش فعال، مقداری انرژی برای گردش سیال خنک‌کننده مصرف می‌شود، اما در روش غیرفعال، حرارت به طور طبیعی به محیط منتقل می‌شود. یکی از رویکردهای کارآمد در این زمینه، استفاده از تغییر فاز مایع-بخار است که به دلیل جذب حرارت بالا در دمای ثابت، می‌تواند به طور مؤثری دمای باتری را کنترل کند و در این مقاله از این روش استفاده شده است.

در طی سال‌های گذشته، روش‌های متعدد و هوشمندانه‌ای برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه مروری انجام‌شده توسط چوداری و همکاران [۱] به بررسی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت حرارتی (شامل انتقال حرارت جابه‌جایی توسط سیال هوا، انتقال حرارت جابه‌جایی توسط سیال مایع، مواد تغییر فازدهنده و ترکیب این روش‌ها) بر اساس معیارهای دمای حداکثری و یکنواختی دمایی پرداخته و نشان داده است که روش‌های خنک‌کاری ترکیبی می‌توانند بهترین عملکرد را در شرایط عملیاتی مختلف ارائه دهند. نتایج نشان دادند که سیستم‌های ترکیبی می‌توانند دمای حداکثری سلول را تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نرخ دشارژ 4C کاهش دهند و اختلاف دما را به کمتر از ۵ درجه محدود کنند. با این حال، اکثر مطالعات بررسی‌شده فاقد تحلیل جامع تجربی از تأثیر ارتفاع غوطه‌وری بوده و همچنین پاسخ سیستم در نرخ‌های متوالی دشارژ کمتر مورد توجه قرار گرفته است، که نشان‌دهنده نیاز به مطالعات تجربی دقیق‌تر با شرایط واقعی عملکردی است.

در مقاله مروری دیگری نویسندگان بر تأثیر زیاد دو نوع سیستم مدیریت حرارتی بر اساس تغییر فاز، شامل سیستم‌های مبتنی بر تغییر فاز جامد-مایع و سیستم‌های مبتنی بر تغییر فاز مایع-گاز (مثل لوله حرارتی)، تأکید کردند [۲]. آن‌ها دریافتند که استفاده از مواد تغییر فازدهنده با خواص حرارتی بهینه می‌تواند باعث کاهش دمای حداکثری و بهبود یکنواختی دما در بسته‌های باتری شود. همچنین آن‌ها با بررسی مطالعات مربوط به مدل‌سازی ترموفیزیکی باتری‌ها دریافتند که پیش‌بینی دقیق توزیع دما و روند افزایش آن در فرایندهای شارژ و دشارژ، می‌تواند مبنایی برای طراحی بهینه سیستم‌های مدیریت

حرارتی باتری باشد. این پژوهش نشان داد که استفاده از سیستم تغییر فازدهنده با رسانایی حرارتی پایین، به رغم کاهش دمای حداکثری تا ۴۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط عملیاتی، به دلیل عدم توانایی در دفع سریع حرارت، در بارگذاری‌های متناوب یا نرخ‌های دشارژ بالا دچار عملکرد ضعیف می‌شود. همچنین، در این مطالعه بیشتر تمرکز بر مدل‌سازی نظری و عددی بوده و تحقیقات تجربی در مقیاس واقعی محدود گزارش شده است.

یکی دیگر از روش‌های مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون استفاده از مینی‌کانال‌هاست. فیاض و همکاران [۳] به بررسی بهینه‌سازی پارامترهای طراحی ساختاری مینی‌کانال‌ها، مانند نوع و تعداد کانال‌های جریان، فاصله بین باتری‌ها و زوایای ورود و خروج سیال خنک‌کننده پرداخته است. با توجه به چالش‌های موجود در حفظ تعادل دمایی باتری‌های لیتیوم-یونی، بهینه‌سازی این پارامترها از طریق الگوریتم‌های محاسباتی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و روش سطح پاسخ به عنوان یک رویکرد کلیدی در افزایش عملکرد و طول عمر این باتری‌ها معرفی شده است. استفاده از خنک‌سازی مایع باعث کاهش دمای حداکثر باتری به کمتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد در نرخ دشارژ 3C شد. همچنین بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جریان و فاصله سلول‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک باعث کاهش اختلاف دمای بین سلول‌ها به کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد شد. با این حال، این مطالعه عمدتاً بر شبیه‌سازی‌های عددی تمرکز داشته و تأثیر شرایط مرزی واقعی را در نظر نگرفته است، که محدودیتی مهم برای تعمیم نتایج آن در کاربردهای صنعتی محسوب می‌شود.

در پژوهش انجام‌شده توسط ژوانگ و همکاران [۴] استفاده از ساختار جدیدی شامل منشورهای لوزی شکل توخالی واقع‌شده در فاصله بین باتری‌ها در بسته باتری، به منظور بهبود عملکرد خنک‌سازی و بهینه‌سازی فاصله بین باتری‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، جریان هوای رفت‌وبرگشتی برای بهبود یکنواختی دمای باتری‌ها و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند دمای باتری را در نرخ دشارژ 2C زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته و تفاوت دمای بین سلول‌ها را تا حدود ۴/۳ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. این طراحی باعث صرفه‌جویی انرژی تا ۷۶/۴٪ نسبت به سیستم‌های سنتی شد. با این حال، این مطالعه صرفاً عملکرد سیستم را در شرایط دمای محیط نرمال (حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) تحلیل کرده و رفتار آن در شرایط محیطی شدید (مانند سرمای زیر صفر یا رطوبت بالا) مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، از منظر جنس مواد رابط حرارتی و نقش

ذخیره‌سازهای گرما مانند مواد تغییر فازدهنده ارزیابی جامعی انجام نشده است.

مقاله‌های بسیار جدیدی درخصوص مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون منتشر شده‌اند. شریفی و همکاران [۵] به بررسی یک روش خنک‌سازی ترکیبی برای باتری‌های لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ با استفاده از لوله‌های حرارتی و مواد تغییر فازدهنده پرداخته‌اند. این روش برای کاربردهای وسایل نقلیه الکتریکی طراحی شده است. نوآوری اصلی این تحقیق در جداسازی مواد تغییر فازدهنده از باتری‌ها و قرار دادن آن بین بخش باتری و بخش خنک‌کننده هواست. این طراحی باعث کاهش پیچیدگی سیستم و افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی می‌شود. در آزمایش‌های آن‌ها، استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سرعت هوای ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه موجب کاهش دمای پایدار باتری به ترتیب حدود ۱۴٪، ۱۰٪ و ۴٪ نسبت به حالت بدون مواد مذکور شد. همچنین، در شرایط توان ورودی ۱۶ وات (معادل دشارژ حدود 5C)، دمای باتری در حالت وجود این مواد زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد باقی ماند. با این حال، طراحی آن‌ها با فرض تماس غیرمستقیم مواد تغییر فازدهنده با باتری انجام شد که گرچه مزایایی مانند کاهش پیچیدگی دارد، ممکن است کارایی کلی جذب گرما را نسبت به طراحی‌هایی با تماس مستقیم کاهش دهد. همچنین، محدودیت در استفاده از این مواد با هدایت حرارتی پایین باقی مانده و هنوز نیاز به بهبود در انتقال حرارت داخلی وجود دارد.

کیهانی اصل و همکاران [۶] یک سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی نوآورانه برای باتری‌های لیتیوم-یون ارائه کرده‌اند که از مواد تغییر فازدهنده، فوم مسی به عنوان پره‌های متخلخل و لایه‌های متخلخل، و خنک‌کنندگی مایع استفاده می‌کند. این سیستم شامل دوازه باتری لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ است که در محفظه‌های آلومینیومی قرار گرفته‌اند و از فوم مسی به عنوان پره‌های طولی متخلخل درون مواد تغییر فازدهنده و لایه‌های متخلخل درون لوله‌های مسی در صفحات خنک‌کننده استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که در نرخ دشارژ 5C، استفاده از پره‌های متخلخل باعث کاهش ۹/۱۸ درجه‌ای دمای سطح باتری نسبت به حالت بدون پره خالص شد و تفاوت دمای بین سلول‌ها نیز به کمتر از ۱ درجه کلوین محدود شد. همچنین، استفاده از پره‌های متخلخل به جای پره‌های توپر، باعث افزایش حدود ۲۵٪ انرژی مخصوص سیستم شد. با این حال، این پژوهش عمدتاً بر شبیه‌سازی‌های عددی تمرکز داشته و تأیید تجربی کامل برای طراحی ارائه شده انجام نشده است؛ همچنین، بحثی درباره

اثر نوسانات دمای محیط یا شرایط شارژ (در کنار دشارژ) ارائه نشده است که می‌تواند در طراحی واقعی سیستم اهمیت داشته باشد.

در پژوهشی که توسط یائو و همکاران [۷] انجام شده است، ضمن بررسی روش‌های مختلف مدیریت حرارتی باتری، تأثیر طراحی بیومیمتیک (الهام‌گرفته از طبیعت) را در بهبود توزیع دما، کاهش مصرف انرژی، و افزایش کارایی تحلیل کرده‌اند. برای مثال، استفاده از ساختارهای الهام‌گرفته از برگ گیاهان، فلس ماهی، پوست کوسه و لانه زنبور، منجر به بهبود یکنواختی دما و افزایش عملکرد خنک‌کنندگی به میزان ۳۴/۶٪ تا ۶۹٪ در مقایسه با ساختارهای متداول شده است. با این حال، بسیاری از نتایج گزارش شده در این مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی‌های عددی یا نتایج آزمایشگاهی محدود هستند و تأیید تجربی سیستم‌های بیومیمتیک در کاربردهای چندلایه و شرایط عملیاتی شدید (مثلاً نرخ دشارژ بالا یا دمای پایین) هنوز به طور کامل انجام نشده است، که نشان‌دهنده نیاز به تحقیقات تجربی گسترده‌تر در این حوزه است.

نجفی و همکاران [۸] ترکیب سیستم خنک‌کننده هوا و ماژول‌های ترموالکتریک را به عنوان یک راهکار نوین برای بهبود اتلاف حرارت و کاهش دمای سطحی باتری مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های انجام شده در دماهای ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های دشارژ ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ آمپر نشان داده‌اند که استفاده همزمان از فن و ماژول ترموالکتریک، زمان عملکرد باتری را ۱۷/۱ درصد افزایش داده و نرخ انتقال حرارت را ۱۵/۲ درصد بهبود بخشیده است.

در مطالعه‌ای که توسط لی و همکاران [۹] انجام شده، یک سیستم مدیریت حرارتی غیرفعال برای باتری‌های اتوبوس برقی با استفاده از لوله‌های حرارتی و مواد تغییر فازدهنده، طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این سیستم، سرمایش تنها از طریق باد طبیعی حاصل از حرکت خودرو انجام می‌گیرد و تأثیر تغییرات ظرفیت مسافر، دمای محیط، توقف‌های متوالی و شرایط واقعی رانندگی بر عملکرد حرارتی باتری‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد که با وجود افزایش بار مسافر و سرعت، سیستم توانسته است افزایش دما و اختلاف دمای سلول‌ها را در محدوده ایمن نگه دارد.

در پژوهشی نوین، رویکردی مؤثر برای ساخت مواد تغییر فازدهنده با استفاده از اتصالات عرضی چندگانه پیوند هیدروژنی ارائه شده است [۱۰]. این مواد که برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون طراحی شده‌اند، در عین داشتن استحکام مکانیکی بالا و ظرفیت نهان گرمایی مناسب، از قابلیت بازیافت آسان نیز برخوردارند. برخلاف روش‌های مرسوم که مبتنی بر واکنش‌های شیمیایی با قابلیت

باز یافت پایین هستند، این راهکار جدید یک گزینه کارآمد و پایدار برای استفاده در سامانه‌های مدیریت حرارتی پیشرفته محسوب می‌شود.

فنگ و همکاران [۱۱] یک محفظه بخار فوق نازک با شکل L طراحی کرده و به منظور استفاده در مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون مورد بررسی تجربی قرار داده‌اند. این محفظه بخار از فناوری تغییر فاز مایع-بخار برای بهبود یکنواختی دمایی استفاده می‌کند. عملکرد حرارتی این سیستم تحت شرایط مختلفی مانند زاویه شیب، ارتعاش، و دمای مایع خنک‌کننده تحلیل شده است. نتایج نشان داد که مقاومت حرارتی در زاویه ۴۵ درجه بیشینه است و در زاویه‌های کمتر از ۳۰ درجه، ارتعاش می‌تواند عملکرد حرارتی را بهبود بخشد. همچنین، حتی در نرخ دشارژ بالای 3C، دمای سلول‌ها با استفاده از این سیستم زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند و اختلاف دمای میان سلول‌ها کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد است.

لی و همکاران [۱۲] در یک مطالعه جدید، یک سیستم مدیریت حرارتی جدید بر مبنای لوله حرارتی ضربانی حلقه بسته برای مازول باتری طراحی و ارزیابی کرده‌اند. این سیستم با استفاده از نانوسیال اکسید تیتانیوم و یک صفحه آلومینیومی با سطح خنک‌کاری بزرگ، عملکرد حرارتی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. عملکرد سیستم در سناریوهای متنوع و ابعاد مختلف عملیاتی مورد آزمون قرار گرفته و روابط میان رفتار حرارتی و پاسخ الکتریکی باتری‌ها تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم همراه با جریان هوای اجباری قادر است دمای مازول باتری را بیش از ۳۰٪ کاهش داده و اختلاف دمای بین سلول‌ها را زیر ۴/۳ درجه سانتی‌گراد نگه دارد. همچنین، در حین تخلیه جریان ثابت، بیشترین افت ولتاژ در این سیستم مشاهده شده است که به بهبود عملکرد حرارتی-الکتریکی باتری منجر می‌شود.

در تحقیق دیگری که ژانگ و همکاران [۱۳] انجام داده‌اند، یک رویکرد نوآورانه برای بهینه‌سازی توزیع ناهمگن مواد تغییر فازدهنده نانو در سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری پیشنهاد شده است. برای دستیابی به طراحی بهینه، چارچوبی ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک توسعه یافته و داده‌های شبیه‌سازی از طریق روش شبکه بولتزمن در ۳۴۳ پیکربندی مختلف استخراج شده‌اند. نتایج نشان دادند که موجب بهبود چشمگیر در نرخ ذوب، توان دفع حرارت و یکنواختی دمایی شده است. این چارچوب بهینه‌سازی توانسته است عملکرد حرارتی را تا ۲۹/۷۳ درصد در برخی شاخص‌ها ارتقا دهد.

در تحقیق انجام‌شده توسط سانگ و همکاران [۱۴]، یک سیستم مدیریت حرارتی باتری براساس خنک‌کاری مستقیم با مبرد طراحی شده است که در آن، جریان مبرد در مسیرهای مارپیچی جریان یافته و به نقطه جوش می‌رسد. باین حال، طول زیاد لوله‌کشی باعث ایجاد مناطق فوق‌داغ در صفحات خنک‌کننده شده و منجر به اختلاف دمایی شدید به‌ویژه در راستای عمودی بسته باتری می‌شود. برای حل این مشکل، دو صفحه خنک‌کننده با مسیرهای مارپیچی موازی در زیر بسته باتری طراحی شده‌اند. مقایسه عملکرد سه ساختار متفاوت مسیر جریان در نرخ دشارژ 1C و دمای اولیه ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که اگرچه صفحه خنک‌کننده زیرین قادر به کنترل دمای حداکثری و یکنواختی افقی است، برای بهبود یکنواختی عمودی دما لازم است یک صفحه خنک‌کننده کوچک به صورت احاطه‌شده در بالای بسته باتری اضافه شود. با این تغییر، اختلاف دمای عمودی به کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد محدود شده و الزامات کنترل حرارتی در کل چرخه شارژ و دشارژ برآورده می‌شود.

موسوی [۱۵] تأثیر صفحات جداکننده را به عنوان یک روش غیرفعال در بهبود عملکرد سیستم خنک‌کاری با هوا برای مازول باتری بررسی کرد. سیستم مورد مطالعه شامل ۸۷ سلول استوانه‌ای لیتیوم‌آهن فسفات با چیدمان زیگزاگی بود و عملکرد آن در نرخ شارژ/دشارژ بالا (5C) تحلیل شده است. با استفاده از یک مدل ترکیبی شامل شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، مدل تحلیلی حرارتی و مدل تجربی، تأثیر این سیستم بر دمای حداکثری، کاهش ظرفیت، و هزینه‌های چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش طول صفحات جداکننده می‌تواند عملکرد حرارتی-هیدرولیکی را بهبود بخشد، دمای حداکثری را کاهش دهد و عمر چرخه‌ای باتری را افزایش دهد. باین حال، برخلاف سیستم‌های لوله‌ای با فاصله زیاد، این پیکربندی باعث کاهش ضریب اصطکاک نمی‌شود و هزینه‌های بالای گردش هوا ممکن است کارایی اقتصادی آن را در بلندمدت زیر سؤال ببرد.

برخلاف روش‌های مرسوم که عمدتاً از مواد تغییر فازدهنده جامد-مایع و سیستم‌های خنک‌کاری فعال استفاده می‌کنند، این تحقیق تجربی یک رویکرد جدید بر پایه تغییر فاز مایع-بخار ارائه داده است که با استفاده از مبرد R141-b به کاهش دمای باتری کمک می‌کند. در مقایسه با سیستم‌های خنک‌کاری مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده جامد-مایع که به دلیل رسانایی حرارتی پایین در درازمدت عملکرد ضعیفی دارند، این روش انتقال حرارت بسیار سریع‌تری دارد. اثرات بررسی شده در دو حالت کلی بدون خنک‌کاری و با خنک‌کاری مطالعه

در نظر گرفت، جایی که باتری‌ها در بخش تبخیرکننده آن قرار دارند و سینک حرارتی طراحی شده به‌عنوان چگالنده عمل می‌کند.

در این مطالعه، دوازده سلول لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ برای تولید بسته باتری مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به تماس مستقیم مبرد با باتری‌ها، یک مبرد دی‌الکترونیک انتخاب شد. علاوه بر این، نقطه جوش پایین نیز یک معیار مهم در انتخاب مبرد بود. بر این اساس، ۱-دی‌کلرو-۱-فلوئورواتان (R-141b) به‌عنوان مبرد انتخاب شد. این ماده یک مبرد دی‌الکترونیک با نقطه جوش ۳۲ درجه سانتی‌گراد در فشار اتمسفری است. مشخصات ترموفیزیکی این مبرد در جدول (۱) بیان شده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی مبرد	
مقدار	خاصیت
$C_2H_3Cl_2F$	فرمول شیمیایی
۱۱۶/۹۴ گرم بر مول	جرم مولی
مایعی بی‌رنگ با بوی شبیه به اتر	ویژگی ظاهری
۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در دمای محیط	چگالی
۱۰۳/۵- درجه سانتی‌گراد	نقطه ذوب
۳۲ درجه سانتی‌گراد	نقطه جوش
۴ گرم بر لیتر در دمای محیط	حلالیت در آب

محفظه بسته باتری از بلوک تفلون ساخته شد. یک مکعب مستطیل با ابعاد ۱۱۰×۸۲ میلی‌متر (طول و عرض) و ۸۵ میلی‌متر (ارتفاع) در این بلوک با استفاده از فرزکاری عمودی ایجاد شد. ضخامت دیواره بلوک ۱۰ میلی‌متر بود. ابتدا باتری‌ها درون این مکعب قرار گرفتند و سپس یک سینک حرارتی آلومینیومی با استفاده از ده پیچ روی محفظه نصب شد.

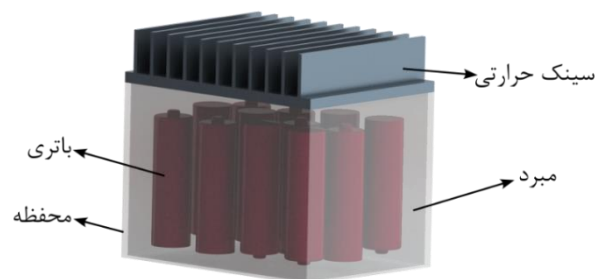
سیم‌های مثبت و منفی بسته باتری، سیم‌های سیستم مدیریت باتری و ترموکوپل‌ها، از دو سوراخ در دیواره محفظه عبور داده شدند. یکی از چالش‌های اساسی در ساخت این محفظه، آب‌بندی آن بود. برای این منظور، اتصال بین سینک حرارتی و محفظه باتری با استفاده از یک اورینگ و فشار پیچ‌ها آب‌بندی شد. سیم‌ها ابتدا از طریق یک شیلنگ پنوماتیک عبور داده شدند تا خروجی سیم‌ها مهر و موم شود. سپس فضای بین شیلنگ و سیم‌ها با رزین پر شد و درنهایت، شیلنگ با استفاده از اتصال پنوماتیکی به محفظه بسته باتری متصل شد (شکل ۲).

شده‌اند. در حالت وجود خنک‌کاری هم چهار اثر مختلف شامل ارتفاع غوطه‌وری، دمای محیط، جابه‌جایی اجباری و وجود هیدروژل بررسی شده‌اند.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه استفاده از مواد تغییر فازدهنده، لوله‌های حرارتی و خنک‌کاری با هوا یا مایع، بررسی تجربی سیستم‌های مبتنی بر تغییر فاز مایع-بخار در شرایط غوطه‌وری کامل و تحلیل دقیق پارامترهایی نظیر ارتفاع غوطه‌وری، دمای اولیه واسطه خنک‌کاری، نرخ دشارژ و تأثیر استفاده از هیدروژل تاکنون به‌صورت جامع انجام نشده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک رویکرد تجربی ترکیبی است که در آن یک سیستم مدیریت حرارتی بر مبنای تبخیر و میعان مستقیم مبرد طراحی و ارزیابی شده و تأثیر همزمان چند متغیر کلیدی بر عملکرد حرارتی باتری بررسی و با نتایج عددی پیشین مقایسه شده است. این مطالعه همچنین به بررسی اثر استفاده از هیدروژل با دمای اولیه پایین بر بهبود عملکرد خنک‌کاری پرداخته است که کمتر در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است.

۲. توصیف سیستم

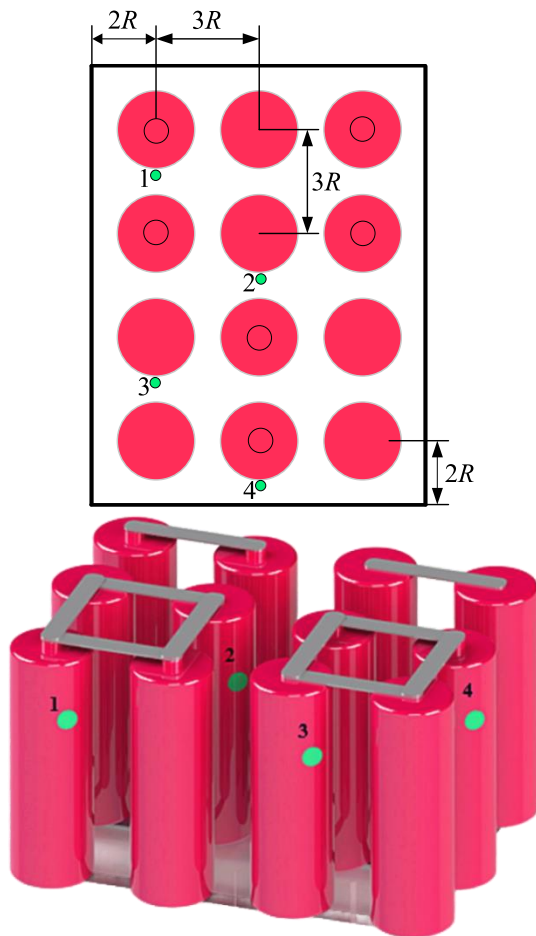
در شکل (۱)، طرح‌واره سیستم مورد نظر دیده می‌شود.



شکل (۱): شماتیک سیستم طراحی شده

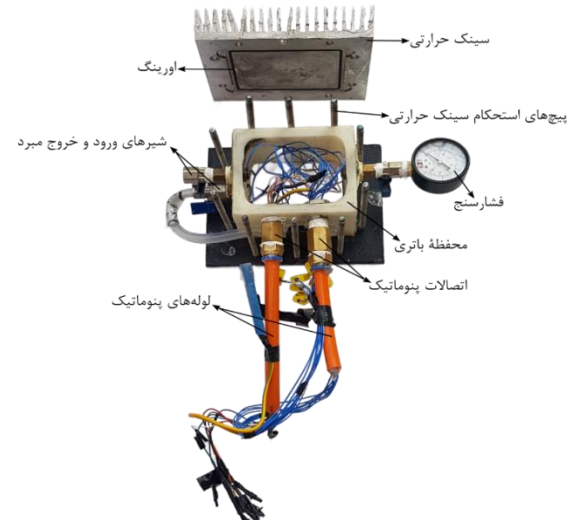
باتری‌ها در یک محفظه مکعبی قرار گرفته‌اند. قسمت بالایی این محفظه از یک صفحه سینک حرارتی آلومینیومی ساخته شده است که برای تبادل حرارت با محیط استفاده می‌شود. این قسمت به‌وسیله چند پیچ به محفظه متصل شده است. در محل اتصال سینک حرارتی به محفظه، یک اورینگ برای ایجاد شرایط آب‌بندی به کار رفته است. سلول‌های باتری درون مبرد غوطه‌ور شده‌اند. با گرم شدن باتری‌ها در طی فرایند دشارژ و به‌دلیل تماس مستقیم با بدنه باتری، فاز مبرد تغییر کرده و به بخار تبدیل می‌شود. بخار تولیدشده به‌صورت آزاد به‌سمت بالا حرکت می‌کند. سپس، این بخار با برخورد به هیت‌سینک آلومینیومی خنک تقطیر شده و به‌صورت مایع به پایین بازمی‌گردد. به عبارت دیگر، این سیستم را می‌توان به‌عنوان یک لوله حرارتی بزرگ

شارژ باتری‌ها ابتدا در حالت جریان ثابت با جریان $2/6$ آمپر آغاز شد و سپس در حالت ولتاژ ثابت تا رسیدن جریان به $0/2$ آمپر ادامه یافت. زمان کل شارژ 120 دقیقه بود. دشارژ باتری‌ها با استفاده از مقاومت‌های الکتریکی انجام شد که امکان تنظیم نرخ‌های مختلف دشارژ را فراهم می‌کرد. در پایان هر آزمایش، ولتاژ تمامی سلول‌ها با استفاده از دیتالاگر بررسی شد تا از تعادل و یکنواختی ولتاژ اطمینان حاصل شود. دمای اتاق محل آزمایش به‌طور مرتب کنترل می‌شد تا در طول آزمایش ثابت بماند. برای ایجاد شرایط دمایی بالاتر از محیط، از یک بخاری برقی استفاده شد.



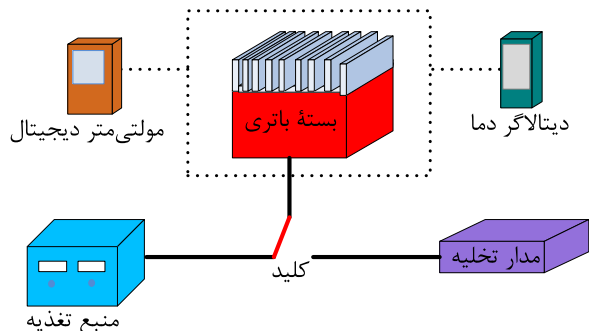
شکل (۴): موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها بر روی باتری‌ها

برای تعیین دمای نقاط مختلف بسته باتری، چهار ترموکوپل مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۴) موقعیت این ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد که روی چهار سلول، در ارتفاع 50 میلی‌متر از کف سلول‌ها نصب شده‌اند. علاوه بر این، سه ترموکوپل دیگر در ارتفاع‌های 20 میلی‌متر، 35 میلی‌متر و 65 میلی‌متر از کف سلول 2 قرار داده شدند. نحوه خنک‌کاری توسط مبرد در ادامه توضیح داده می‌شود. سلول‌ها درون مبرد مایع غوطه‌ورند. در طی فرایند دشارژ گرمای تولیدشده توسط سلول‌ها جذب مبرد می‌شود. با توجه به نقطه جوش



شکل (۲): نمایی از محفظه باتری و متعلقات آن

شکل (۳) نمایی از سیستم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این آزمایش، از یک منبع تغذیه ولتاژ مستقیم برای شارژ بسته باتری استفاده شد. برای دشارژ بسته باتری، از مدارهایی شامل مجموعه‌ای از مقاومت‌های الکتریکی استفاده شد. به منظور جلوگیری از شارژ بیش از حد و دشارژ بیش از حد، سیستم مدیریت باتری در هر دو فرایند به کار گرفته شد. ولتاژ و جریان توسط مولتی‌متر دیجیتال دوکاناله ثبت شد. دمای سلول‌های مختلف توسط ترموکوپل‌های نوع K اندازه‌گیری شده و داده‌ها از طریق دیتالاگر دماسنج چهارکاناله ثبت شدند. دقت این نوع ترموکوپل‌ها در محدوده 1 درجه سانتی‌گراد است. اما دماهای اندازه‌گیری شده توسط این ترموکوپل‌ها توسط دو عدد دیتالاگر چهارکاناله اندازه‌گیری و ذخیره شد. دقت دیتالاگر مورد استفاده در محدوده $0/1$ درجه سانتی‌گراد است. به منظور بهره‌مندی از این دقت عملکرد، پیش از ساخت سیستم آزمایشگاهی ابتدا ترموکوپل‌ها توسط دیتالاگر کالیبره شد تا دقت نتایج براساس دقت دیتالاگر در محدوده $0/1$ درجه سانتی‌گراد شود. فشار محفظه بسته باتری در آغاز و پایان فرایند دشارژ توسط فشارسنج متصل به محفظه اندازه‌گیری شد که دقت آن $0/05$ بار است.



شکل (۳): طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده

مرحله چهارم: استفاده از هیدروژل در دو دمای اولیه متفاوت (۱۰ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد)، همراه با غوطه‌وری کامل. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط کنترل‌شده و با تکرار دو بار انجام شده‌اند تا از تکرارپذیری داده‌ها و کاهش اثر خطاهای تصادفی اطمینان حاصل شود و میانگین نتایج گزارش شده است. مقادیر انحراف معیار، به دلیل دقت بالا و ثبات شرایط، معمولاً کمتر از ± 0.3 درجه سانتی‌گراد برای دما و ± 0.5 بار برای فشار بوده‌اند.

۱.۳. شرایط بدون خنک‌کاری

در ابتدا، آزمایش برای نرخ‌های دشارژ 1C، 2C، 3C و 4C بدون سیستم خنک‌کاری انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که افزایش نرخ دشارژ منجر به افزایش دمای سلول‌های باتری می‌شود. در اولین تلاش برای انجام آزمایش در شرایط بدون خنک‌کاری، بسته باتری داخل محفظه طراحی‌شده قرار داده شد و فرایندهای شارژ و دشارژ انجام گرفت. با توجه به عدم امکان تبادل هوا هنگام بسته بودن سینک حرارتی و همچنین رسانایی حرارتی پایین هوای داخل محفظه، دمای سلول‌ها به سرعت افزایش یافت. به‌ویژه، در نرخ دشارژ 4C، افزایش بیش از حد دما منجر به انفجار یکی از سلول‌های واقع در گوشه بسته باتری شد.

پس از این رویداد، تمامی سلول‌ها تعویض شدند و آزمایش مجدداً در شرایط بدون خنک‌کاری انجام گرفت. در این آزمایش‌ها، باتری‌ها داخل محفظه قرار داده شدند، اما برای امکان تبادل حرارتی با محیط از طریق جابه‌جایی طبیعی، بخش سینک حرارتی که سقف بسته باتری را تشکیل می‌دهد، نصب نشد. علاوه بر این، برای حفظ ایمنی، دستورالعمل آزمایش به گونه‌ای تنظیم شد که در صورت افزایش دمای هر نقطه از بسته باتری به بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد، جریان بلافاصله قطع شود. بنابراین، در نرخ دشارژ 4C، آزمایش پس از ۷۴۰ ثانیه و پیش از تکمیل فرایند متوقف شد. شکل (۵) تغییرات دمای سلول‌های مختلف را در نرخ دشارژ 4C نشان می‌دهد. از آنجاکه سلول شماره ۲ در مرکز بسته باتری قرار دارد، تبادل حرارت آن با محیط اطراف دشوارتر از سایر سلول‌ها خواهد بود؛ بنابراین انتظار می‌رود که دمای آن از سایر سلول‌ها بیشتر باشد. نتایج ارائه‌شده در شکل (۵) این موضوع را تأیید می‌کند. در پایان فرایند دشارژ، حداقل و حداکثر اختلاف دما بین سلول ۲ و سایر سلول‌ها به ترتیب برابر با ۶/۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۱/۶ درجه سانتی‌گراد بوده است.

مبرد (۳۲ درجه سانتی‌گراد در فشار اتمسفر) با گرم شدن سلول‌ها، فرایند تغییر فاز مایع به بخار (جوشش) در مبرد مجاور سطح سلول ایجاد می‌شود. فشار اولیه درون بسته، فشار اتمسفر است که البته با تبخیر مبرد به مرور افزایش می‌یابد و به فشار ۱/۷۵ بار مطلق می‌رسد. مبرد تغییر فاز یافته به سمت بالا حرکت کرده و به سطح زیرین سینک حرارتی برخورد می‌کند. قسمت بالایی سینک حرارتی (پره‌ها) در محیط با دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. با توجه به وجود پره‌ها در این سطح و تبادل حرارت خوب با محیط، بنابراین فرایند تغییر فاز بخار به مایع (تقطیر) برای بخار در تماس با سینک حرارتی حاصل می‌شود. مبرد تقطیرشده بر اثر نیروی گرانش به سمت پایین سقوط می‌کند.

قرار گرفتن سطح فوقانی سینک حرارتی در دمایی پایین‌تر از نقطه جوش مبرد، افزایش سطح تبادل حرارت این قسمت از سینک حرارتی با محیط (از طریق وجود پره‌های طولی در آن) و همچنین جنس آلومینیومی سینک حرارتی عوامل ایجاد فرایند تقطیر مبرد بخار شده در تماس با سطح زیرین سینک هستند. در این سیکل ترمودینامیکی سلول‌ها به عنوان تبخیرکننده (اوپراتور) باعث تغییر فاز مایع به بخار مبرد می‌شوند و سینک حرارتی به دلیل تبادل حرارت با محیطی که در دمایی کمتر از دمای تغییر فاز مبرد قرار دارد، نقش تقطیرکننده (کندانسور) را ایفا می‌کند. سلول‌ها در قسمت پایین و سینک حرارتی در قسمت فوقانی قرار دارد. حرکت مبرد بین اوپراتور و کندانسور ناشی از نیروی گرانش است.

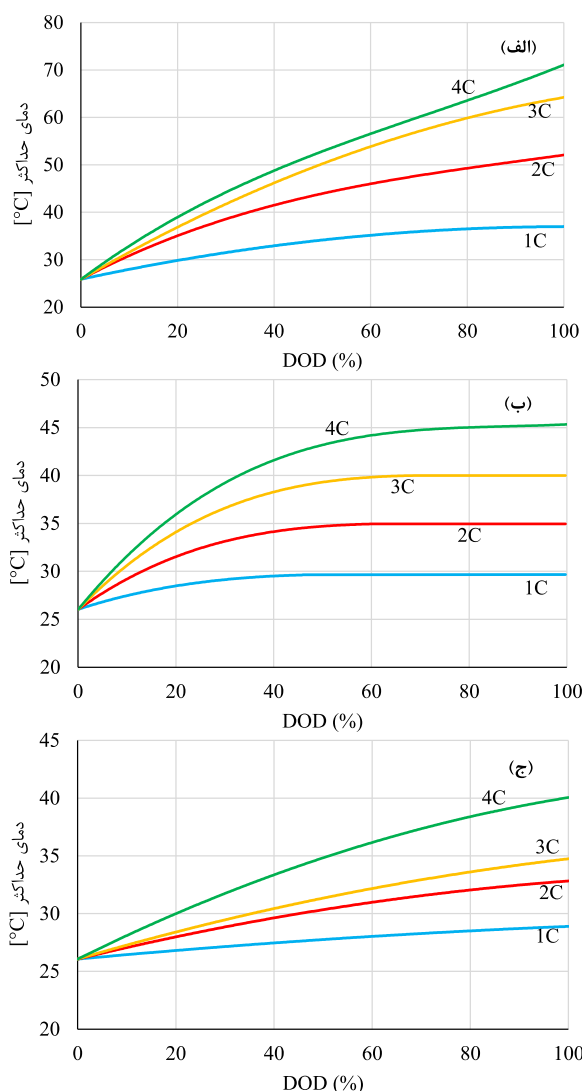
۳. نتایج و بحث

در این پژوهش، آزمایش‌ها به صورت مرحله‌ای و با کنترل تک‌تک متغیرها طراحی و اجرا شدند. ترتیب انجام آزمایش‌ها به گونه‌ای بوده که در هر مرحله تنها یک متغیر مستقل تغییر کرده تا اثر آن بر پاسخ‌های حرارتی باتری به صورت جداگانه تحلیل شود. مراحل طراحی آزمایش به شرح زیر بوده است:

مرحله اول (آزمایش پایه): انجام آزمایش‌ها بدون استفاده از هیچ سیستم خنک‌کاری، در نرخ‌های دشارژ 1C تا 4C، برای تعیین رفتار حرارتی مرجع باتری‌ها.

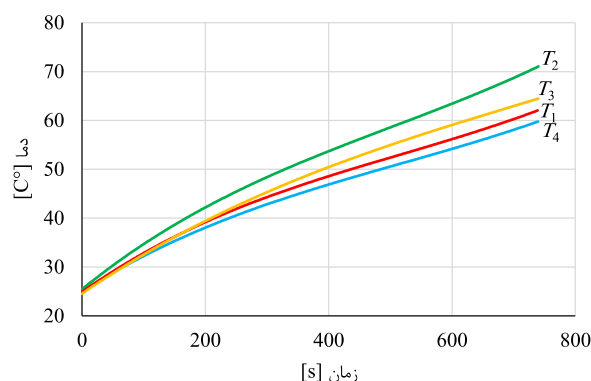
مرحله دوم: بررسی اثر ارتفاع غوطه‌وری مبرد در سه حالت: بدون غوطه‌وری، نیمه‌غوطه‌وری (۵۰٪) و غوطه‌وری کامل (۱۰۰٪)، در نرخ‌های مختلف دشارژ.

مرحله سوم: اضافه کردن جابه‌جایی اجباری (فن) برای بررسی اثر ترکیب آن با غوطه‌وری.



شکل (۶): تأثیر ارتفاع غوطه‌وری باتری‌ها در مبرد بر دمای حداکثر باتری بحرانی: (الف) بدون خنک‌کاری؛ (ب) غوطه‌وری ۵۰ درصد؛ (ج) غوطه‌وری ۱۰۰ درصد

در شکل (۶ ب) دمای سلول‌ها نسبت به شرایط بدون خنک‌کاری کاهش یافته است، اما همچنان افزایش دما با بالا رفتن نرخ دشارژ مشاهده می‌شود. در نرخ دشارژ 4C، دمای حداکثر همچنان نسبتاً زیاد است، اما اولاً دما بسیار پایین‌تر از حالت بدون خنک‌کاری می‌باشد و ثانیاً بسته باتری توانسته به شرایط دمای پایدار رسیده و منفجر نشود. کاهش نسبی دما نسبت به حالت بدون خنک‌کاری در نرخ‌های مختلف دشارژ از 1C تا 4C، به ترتیب ۱۹/۸۵٪، ۳۲/۸۷٪، ۳۷/۶۲٪ و ۳۶/۱۷٪ است و نشان‌دهنده کاهش بیشتر دما در نرخ‌های دشارژ بالاتر است و این امری مطلوب به حساب می‌آید. قرار گرفتن نیمی از بسته باتری در مایع مبرد باعث بهبود تبادل حرارت شده است، اما این خنک‌کاری به‌طور کامل مؤثر نیست؛ زیرا بخش بالایی باتری‌ها هنوز در معرض هوای داخل محفظه قرار دارد که رسانایی



شکل (۵): تغییرات دمای ۴ باتری مختلف با نرخ دشارژ 4C و شرایط بدون خنک‌کاری

۲.۳. تأثیر ارتفاع غوطه‌وری باتری‌ها در مبرد بر رفتار حرارتی بسته باتری

آزمایش‌ها برای ارتفاع‌های مختلف مبرد در بسته باتری و در نرخ‌های دشارژ گوناگون انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که سلول شماره ۲ در تمامی شرایط بیشترین دما را در مقایسه با سایر سلول‌ها تجربه کرده است؛ بنابراین، دمای این سلول در شکل (۶) ارائه شده است تا نتایج مربوط به حداکثر دمای ثبت شده نمایش داده شود. محور افقی نمودارها عمق دشارژ^۱ برحسب درصد را نشان می‌دهد. عمق دشارژ طبق تعریف درصدی از ظرفیت کل یک باتری است که در طی فرایند دشارژ مصرف شده است.

شکل مذکور نتایج مربوط به ارتفاع‌های مختلف غوطه‌وری سلول‌ها را در نرخ‌های دشارژ متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود، تولید حرارت در باتری‌ها طی فرایند دشارژ شدن موجب افزایش دمای حداکثر می‌شود. با افزایش نرخ دشارژ، هم شیب تغییرات دما شدیدتر است و هم حداکثر دما مقادیر بیشتری به خود می‌گیرد.

در شکل (۶ الف) که شرایط بدون خنک‌کاری را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که تلفات انرژی در باتری منجر به تولید شدید حرارت شده و به دلیل رسانایی حرارتی پایین هوای داخل محفظه، این حرارت به راحتی دفع نمی‌شود. افزایش نسبی دما در نرخ‌های دشارژ 2C و 3C و 4C نسبت به نرخ دشارژ 1C به ترتیب ۷۴٪، ۹۲٪ و ۹۲٪ افزایش می‌یابد. این نمودار نشان‌دهنده اهمیت استفاده از یک سیستم خنک‌کاری مؤثر برای جلوگیری از افزایش بیش از حد دماست.

1. Depth of discharge (DOD)

حالت دوم و سوم استفاده از هیدروژل (پتاسیم پلی اکریلات محلول در آب) در فضای خالی بین پره‌های سینک حرارتی بود. در حالت دوم دمای اولیه هیدروژل ۲۴ درجه سانتی‌گراد و در حالت سوم دمای اولیه هیدروژل ۱۰ درجه سانتی‌گراد بود. شکل (۷) اثر این دو حالت مختلف را بر روی دمای باتری نشان می‌دهد.

این شکل تأثیر استفاده از هیدروژل در فضای خالی بین پره‌های سینک حرارتی بر حداکثر دمای باتری را تحت نرخ دشارژ 4C و غوطه‌وری ۱۰۰ درصدی باتری‌ها درون مبرد بررسی می‌کند. نمودار آبی (با هیدروژل و دمای اولیه ۲۴ درجه سانتی‌گراد) کاهش محسوسی در دمای حداکثر نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده بهبود عملکرد سیستم خنک‌سازی با استفاده از هیدروژل است. در این حالت دمای نهایی نسبت به حالت بدون هیدروژل حدود ۸/۷۴٪ کاهش را نشان می‌دهد. نمودار قرمز (با هیدروژل و دمای اولیه ۱۰ درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهد که در شرایطی که دمای اولیه کمتر باشد، حداکثر دمای باتری به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر باقی می‌ماند. کاهش نسبی دما در این حالت نسبت به حالت بدون استفاده از هیدروژل، ۱۳/۸۸٪ است. افزایش دفع حرارت از طریق سینک حرارتی به معنای میعان بیشتر در محفظه باتری است. در نهایت، این فرایند موجب کاهش فشار نهایی محفظه می‌شود.

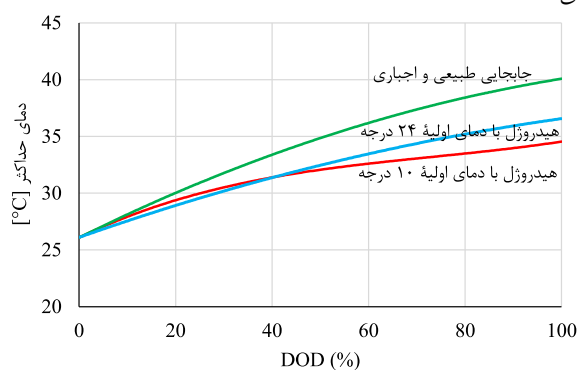
در حالت‌های دوم و سوم، فشار نهایی محفظه باتری به‌ترتیب ۴۴/۴ درصد و ۲۲/۲ درصد کاهش یافته است. در واقع استفاده از هیدروژل هرچند باعث کاهش سطح تماس بین سینک حرارتی و هوای محیط می‌شود، اما ظرفیت گرمایی ویژه بالای هیدروژل موجب افزایش اتلاف حرارت از طریق سینک حرارتی شده و در نتیجه، دمای حداکثری سلول‌های باتری کاهش یافته است. استفاده از هیدروژل باعث می‌شود که دمای پایدار نهایی کمتر از حالت بدون هیدروژل باشد که نشان‌دهنده کاهش استرس حرارتی روی باتری است. در شکل (۸)، تغییرات ولتاژ و جریان برحسب زمان در حالت‌های دشارژ با نرخ‌های 1C و 2C مشاهده می‌شود.

حرارتی کمتری دارد. این روش تا حدی می‌تواند دمای بسته باتری را کاهش دهد، اما برای نرخ‌های دشارژ بالا همچنان کافی نیست. نمودار نشان می‌دهد که افزایش میزان غوطه‌وری باتری‌ها می‌تواند تأثیر خنک‌کاری را بهبود دهد.

در شکل (۶ ج) در تمام نرخ‌های دشارژ (1C تا 4C)، دمای سلول‌ها نسبت به دو نمودار قبلی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. در نرخ دشارژ 4C، دمای حداکثر به میزان چشمگیری کمتر از دو حالت قبلی است، که نشان‌دهنده تأثیرگذاری بیشتر این روش است. کاهش نسبی دما نسبت به حالت بدون خنک‌کاری در نرخ‌های مختلف دشارژ از 1C تا 4C، به‌ترتیب ۲۱/۹٪، ۳۶/۹۸٪، ۴۵/۸۹٪ و ۴۳/۶۵٪ است و بنابراین نشان می‌دهد که غوطه‌وری کامل سلول‌های باتری در مبرد، بهترین عملکرد را در کاهش دما ارائه داده است؛ زیرا تمامی سطح باتری به‌طور یکنواخت با مایع خنک‌کننده در تماس است. در این شرایط، حرارت تولید شده درون باتری‌ها به‌سرعت دفع می‌شود، که باعث کاهش دمای حداکثر و یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در بسته باتری می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که برای کنترل دمای سلول‌ها در نرخ‌های دشارژ بالا، استفاده از غوطه‌وری کامل در مبرد بهترین گزینه است.

۳.۳. اثر افزایش نرخ انتقال حرارت از سینک حرارتی

بعد از بررسی انتقال حرارت در داخل بسته باتری، اثر افزایش نرخ انتقال حرارت در بیرون بسته باتری، یعنی در سینک حرارتی بررسی شد. سه حالت مختلف آزمایش شد. حالت اول اعمال جابه‌جایی اجباری بر روی سینک حرارتی توسط یک فن بود که جریان هوا با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه را برقرار می‌ساخت. با انجام آزمایش در این حالت هیچ تغییر محسوسی بر روی تغییرات دمای حداکثر بسته باتری مشاهده نشد. بنابراین تغییر رژیم انتقال حرارت جابه‌جایی از طبیعی به اجباری در سینک حرارتی تغییری در دمای باتری‌ها ایجاد نمی‌کند.



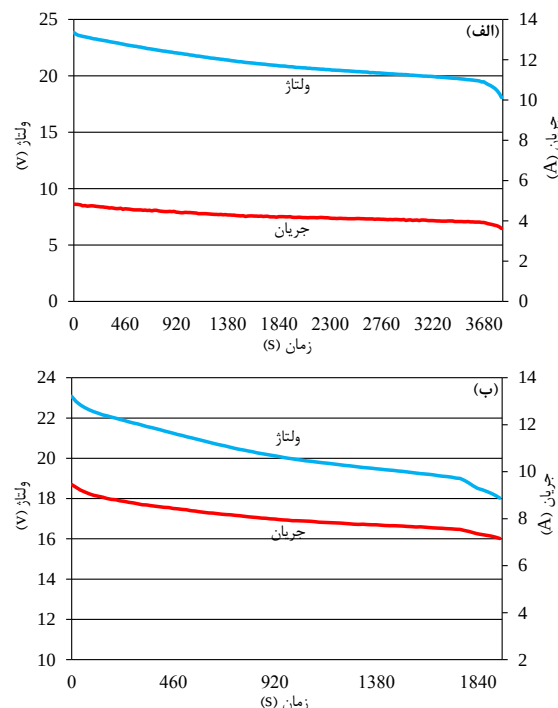
شکل (۷): اثر استفاده از هیدروژل در فضای خالی بین پره‌های سینک حرارتی بر روی دمای حداکثر باتری

۴. نتیجه گیری

هدف این تحقیق، ارائه و ارزیابی یک روش نوین مدیریت حرارتی برای باتری‌های لیتیوم-یون بود که با استفاده از سیستم تغییر فاز مایع-بخار و شرایط غوطه‌وری در مبرد R-141b انجام شد. انگیزه اصلی مطالعه، کنترل دمای باتری در جریان‌های بالا (تا 4C) برای افزایش ایمنی و بهبود عملکرد باتری بود. برای این منظور، یک دستگاه آزمایشگاهی شامل یک محفظه تفلونی، سیستم غوطه‌وری، فن خنک‌کاری و حسگرهای دقیق دما و فشار طراحی و ساخته شد.

در این پژوهش، تأثیر چهار متغیر اصلی شامل ارتفاع غوطه‌وری (۰٪، ۵۰٪، ۱۰۰٪)، نرخ دشارژ (1C تا 4C)، استفاده از جابه‌جایی اجباری و به‌کارگیری هیدروژل در دو دمای اولیه (۱۰ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد) بر دمای حداکثری سلول‌ها به‌صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط غوطه‌وری کامل و دشارژ 4C، دمای حداکثری سلول‌ها تا ۴۴ درصد یعنی به‌اندازه ۳۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و استفاده از هیدروژل با دمای اولیه ۱۰ درجه منجر به کاهش ۴۴/۴ درصدی فشار نهایی محفظه و کاهش ۱۳/۸۸ درصدی دما شد. همچنین، استفاده از فن جابه‌جایی اجباری به‌تنهایی اثربخشی قابل‌توجهی نداشت.

این نتایج نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از تغییر فاز مایع-بخار و واسطه‌هایی با ظرفیت حرارتی بالا مانند هیدروژل، می‌تواند یک راهکار مؤثر برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون در شرایط عملیاتی سنگین باشد. کنترل دمای حداکثری و توزیع یکنواخت حرارت نه تنها باعث حفظ ایمنی باتری می‌شود، بلکه نقش مهمی در افزایش طول عمر و پایداری عملکرد آن دارد.



شکل (۸): تغییرات ولتاژ و جریان برحسب زمان در حالت‌های دشارژ با نرخ‌های: (الف) 1C و (ب) 2C

ملاحظه می‌شود که این دو نمودار رفتار تقریباً مشابهی دارند. در هر دو برای نمودار ولتاژ یک افت در ابتدا و یک افت در پایان فرایند وجود دارد. در هر دو نمودار از تقسیم ولتاژ بر شدت جریان، مقدار مقاومت مدار دشارژ در هر لحظه تعیین می‌شود. پس از تعیین، ملاحظه شد که هرچند در طی دشارژ مقاومت مدار نسبت به حالت شروع تغییر می‌کند، این تغییرات در حدود ۱۰ درصد است.

مراجع

- [1] Choudhari V. G., Dhoble D. A. S., Sathe T. M., "A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle", J. Energy Storage, Vol. 32, p. 101729, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729>.
- [2] Jiang, K., Liao, G., Zhang, J. E, F., Chen, J., Leng, E., "Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review", J. Energy Storage, Vol. 32, p. 101816, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101816>.
- [3] Fayaz, H., Afzal, A., Samee, A. D. M., Soudagar, M. E. M., Akram N., Mujtaba M. A., Jilte R. D., Islam M. T., Ağbulut Ü., and Saleel C. A., "Optimization of thermal and structural design in lithium-ion batteries to obtain energy efficient Battery Thermal Management System (BTMS): A critical review", Arch. Comput. Methods Eng., Vol. 29, No. 1, pp. 129–194, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09571-0>.
- [4] Zhuang, W., Liu, Z., Su, H., Chen, G., "An intelligent thermal management system for optimized lithium-ion battery pack", Appl. Therm. Eng., Vol. 189, p. 116767, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116767>.
- [5] Sharifi, N., Shabgard, H., Millard, C., Etufugh, U., "Hybrid heat Pipe-PCM-Assisted thermal management for lithium-ion batteries", Batteries, Vol. 11, No. 2, 2025, <https://doi.org/10.3390/batteries11020064>.
- [6] Keyhani-Asl, A., Perera, N., Lahr, J., Hasan, R., "Innovative hybrid battery thermal management

- system incorporating copper foam porous fins and layers with phase change material and liquid cooling", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 268, p. 125848, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125848>.
- [7] Yao, Z., Yin, R., Peng, Q., "A review on thermal management system and employed biomimetic technology to enhance lithium-ion battery packs for electric vehicles", *J. Energy Storage*, Vol. 111, p. 115399, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115399>.
- [8] Najafi, A., Jadidi, A. M., Rashidi, S., "Experimental study on a thermal management system with air and thermoelectric module designed for lithium-ion battery", *J. Energy Storage*, Vol. 111, p. 115403, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115403>.
- [9] Li, Y., Bian, X., Li, H., Yu, H., Tao, H., "Thermal management of electric bus batteries simulation study using heat pipes and phase change materials under varying passenger capacity and actual driving routes", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 273, p. 126402, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126402>.
- [10] Diao, X., Wang, P., Li, Y., Chen, X., "Multiple hydrogen-bond cross-linking solid-solid phase change materials for batteries' thermal management", *EcoEnergy*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-3, 2025, <https://doi.org/10.1002/ece2.70002>.
- [11] Yi, F., Gan, Y., Li, R., "Thermal performance analysis of L-shaped ultra-thin vapor chamber for lithium battery thermal management considering tilt angle and vibration", *Energy*, Vol. 320, p. 135477, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135477>.
- [12] Li, J., Chen, M., Zeng, X., Song, D., "Research on the thermal management performance of battery module with heat pipe in the full-scenarios and multiple dimensions", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 263, p. 125392, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125392>.
- [13] Zhang, L., Shang, B., Sun, W., Tao, Y., Li, X., Tu, J., "Data-driven optimization of nano-PCM arrangements for battery thermal management based on Lattice Boltzmann simulation", *Energy*, Vol. 313, p. 133670, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133670>.
- [14] song, X., Sun, N., Cao, H., Zhu, G., Li, M., Liu, X., Rao, Z., "Research on a power battery thermal management system using direct refrigerant cooling with parallel serpentine flow paths", *Energy Storage Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 8, pp. 2726, 2024, <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0268>.
- [15] Moosavi, A., *Heat transfer in ordered porous media with application to batteries*, Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2024.