



خنک کاری بسته باتری لیتیوم یون با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده

علیرضا احمدی¹، آرش محمدی^{2*}، ناصر بهارلو هوره³

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: amohammadi@sru.ac.ir

چکیده

یکی از مهم ترین اجزای خودروهای برقی، باتری است. باتری های لیتیوم یون، در بین گزینه های دیگر باتری با توجه به قیمت تمام شده ی پایین تر، طول عمر و چگالی انرژی بالا، مورد توجه و استفاده ی بیشتری قرار گرفته اند. اما مشکلات تولید حرارت مربوط به این باتری ها استفاده از آن ها برای نیاز به چگالی بالای انرژی را با محدودیت هایی روبرو کرده است. از این رو، خنک کاری و مراقبت باتری لیتیوم یون از اهمیت ویژه ای برخوردار است. استراتژی های خنک کاری باتری به سه دسته اصلی خنک کاری فعال، خنک کاری غیرفعال و خنک کاری ترکیبی تقسیم بندی می شود. روش های معمول خنک کاری مجموعه ی باتری، روش های هواخنک، آب خنک، لوله حرارتی، ترموالکتریک، صفحه سرد و مواد تغییر فاز دهنده است. سامانه مدیریت حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده به تنهایی سامانه خنک کاری غیرفعال محسوب می شود. در این مقاله مروری سعی بر این است که مدیریت گرمایی باتری با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده ها به روش های غیرفعال و ترکیبی بررسی شود. مواد تغییر فاز دهنده ها را می توان بر اساس تغییر حالت در زمان دریافت انرژی و تغییر فاز به سه دسته مایع - جامد، مایع - گاز و جامد - جامد تقسیم بندی کرد که دسته مایع - جامد پرکاربردترین هستند. مواد تغییر فاز دهنده کاربردهای مختلفی از جمله ذخیره سازی انرژی خورشیدی و پردازنده مرکزی رایانه را دارند. همچنین در این مقاله برخی از نمونه های ساخته شده از بسته های باتری و مشخصات مازول باتری، موم پارافین و پودر گرافیت آورده شده است.

کلیدواژه ها: باتری لیتیوم یون، مدیریت حرارتی باتری، مواد تغییر فاز

Lithium-ion battery pack cooling using phase change materials

Alireza Ahmadi¹, Arash Mohammadi^{2*}, Nasser Baharlou-Houreh³

1- PhD Student, Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

3- Assistance Professor, Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author's Email: amohammadi@sru.ac.ir

Received: 31 January 2025 Accepted: 02 December 2025

Abstract

One of the most important components of electric vehicle is the battery. Lithium-ion batteries, among other battery options, have received more attention and use due to their lower cost, long life and high energy density. But the heat generation problems related to these batteries have limited their use for high energy consumption due to density requirements. Therefore, the cooling and care of the lithium-ion battery is of particular importance. Battery cooling strategies are divided into three main categories: active cooling, passive cooling, and hybrid cooling. Common methods of cooling the battery pack are air-cooled, water-cooled, heat pipe, thermoelectric, cold plate and phase change materials. A thermal

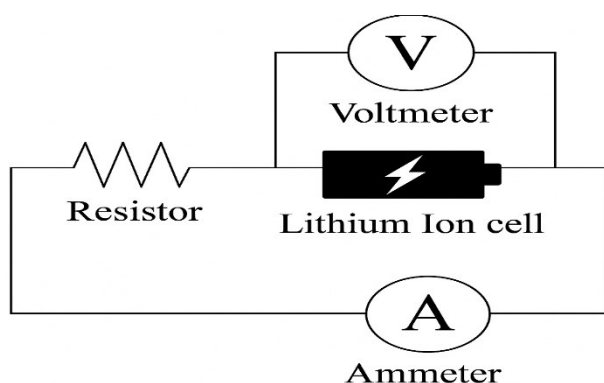
management system with phase change materials alone is considered a passive cooling system. This review article aims to investigate battery thermal management using phase change materials through passive and hybrid methods. Phase change materials can be divided into three categories, liquid-solid, liquid-gas, and solid-solid, based on the change of state at the time of receiving energy and phase change, of which the liquid-solid category is the most widely used. Phase change materials have various applications including solar energy storage and computer CPUs. Also, in this article, some examples of battery packs and battery module specifications, paraffin wax and graphite powder are given.

Keywords: Lithium Ion Battery, Thermal Management, Phase Change Material(PCM)

1- مقدمه

می‌کند [3]. این سیستم‌ها ساده، ارزان، ایمن از نظر الکتریکی، کوچک، بدون نشتی هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری کمی دارند. خنک‌کننده‌های طبیعی برای تأمین نیازهای یک محیط با دمای بالا در سیستم‌های مدیریت حرارتی ماژول‌های باتری بزرگ‌تر کافی نیستند.

خنک‌کننده هوای اجباری برای دور زدن این محدودیت‌ها، همراه با نصب فن‌ها، کانال‌های جریان هوا، ساختارهای باله ای و غیره استفاده می‌شود [4]. جابجایی اجباری به دلیل ظرفیت بیشتر برای اتلاف گرما، راندمان گرما را در یک سیستم باتری در مقایسه با همرفت طبیعی بهبود می‌بخشد [5]. اندازه گیری‌های دقیق ولتاژ و مقاومت مدار باز در شکل 1 به دست آمد. اعمال جریان مشخص به باتری و ارزیابی ولتاژ حاصل در سراسر سلول، با استفاده از قانون اهم، محاسبه دقیق مقاومت داخلی سلول را تسهیل می‌کند [6].



شکل 1 شماتیک برای اندازه گیری مقاومت داخلی [6]

مطالعه پارامتری خنک‌سازی ماژول باتری

اخیراً سلول‌های باتری لیتیوم یون استوانه‌ای به دلیل تولید خودکار کارآمد و ظرفیت کیلووات‌ساعتی مقرون‌به‌صرفه، به طور گسترده در وسایل نقلیه الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای عملکرد بهینه یک سلول، دمای داخلی سلول باید با استفاده از مکانیزم خنک‌کننده مناسب در محدوده 15 تا 35 درجه سانتی‌گراد حفظ شود.

پیامدهای تغییرات آب و هوایی باعث توسعه باتری‌ها برای کاهش رد پای کربن و ترویج پذیرش منابع انرژی پایدار شده است [1]. در نتیجه، انتقال از

باتری‌ها پرکاربردترین نوع سامانه ذخیره انرژی هستند که دارای قیمت کم، قابلیت جابجایی آسان و توانایی کار در شرایط مختلف را دارند. باتری‌ها انرژی برقی را به روش انرژی شیمیایی ذخیره می‌کنند. یک باتری دارای یک الکترولیت، دو الکترود مثبت و منفی، یک جداکننده (از جنس متخلخل) می‌باشد. الکترود از موادی ساخته می‌شود که قابلیت واکنش با الکترولیت از نوع پیوندهای یونی را دارد. باتری‌های لیتیوم یون، در بین گزینه‌های دیگر باتری با توجه به قیمت تمام شده پایین‌تر، طول عمر بالاتر و چگالی انرژی زیاد، مورد توجه و استفاده بیشتری قرار گرفته‌اند. اما مشکلات گرمایی مرتبط با این باتری‌ها باعث شده است که استفاده آن‌ها در مصارف بالای انرژی با محدودیت‌هایی مواجه شود.

تئوری تولید گرما

تولید گرما در یک سلول در هردو فرآیند شارژ و تخلیه انجام می‌شود. ارزیابی تولید گرما در سلول‌های لیتیوم یونی شامل روش‌های مختلفی مانند کالری سنجی و طیف سنجی الکترو امپدانس است که مستلزم نصب‌هایی است که هزینه‌های قابل توجهی دارد [1]. از آنجایی که باتری‌ها در حال شارژ یا شارژ شدن هستند، گرما تولید می‌کنند، تولید گرما در هر دو فرآیند شارژ و دشارژ اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، در دو الکترود، جداکننده، کلکتورهای جریان و زبانه‌هایی که در داخل سلول وجود دارند، به تولید گرمای کل کمک می‌کنند [1]. گرمایش باتری می‌تواند مشکلات پیچیده‌ای را برای باتری و خودرو ایجاد کند. اگر این تولید گرمای بیش از حد کنترل نشود، در نهایت طول عمر و کارایی باتری کاهش می‌یابد و در بدترین حالت، فرار حرارتی رخ می‌دهد و در نهایت ماژول باتری منفجر می‌شود. این فرار حرارتی در باتری لیتیوم یونی به دلیل شارژ بیش از حد، اتصال کوتاه داخلی، خرد شدن یا گرم شدن بیش از حد اتفاق می‌افتد. این ممکن است منجر به شرایط نامطلوب مانند آتش سوزی، دود، انتشار گاز و تجزیه الکترولیت و مواد الکترود شود. تولید گرمای بیش از حد منجر به افزایش دمای باتری و کاهش عمر باتری می‌شود. در هر 15 درجه افزایش دما، 30 درصد از چرخه زندگی سلول کاهش می‌یابد [2].

خنک کردن هوا نشان دهنده مرسوم ترین روش برای سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری است که به طور موثر دمای باتری را در محدوده قابل قبولی حفظ

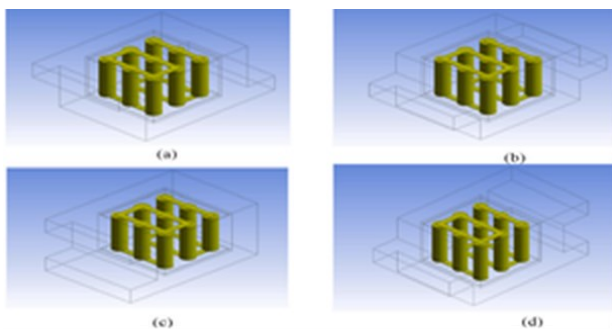
3-1- روش فعال

در این روش از سیال خنک‌کاری استفاده می‌شود که در سیکل عملکردی آن از انرژی مکانیکی جهت به گردش درآوردن سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. در این روش معمولاً از هوا به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده و برای به حرکت درآوردن آن از فن استفاده می‌شود. هواخنک مهم‌ترین نمونه‌های سامانه خنک‌کاری فعال است.

3-1-1- خنک‌کننده هوا

خنک‌کننده هوا مرسوم‌ترین روش برای خنک‌سازی باتری در نظر گرفته می‌شود که شامل دو تغییر می‌شود: خنک‌سازی آزاد و خنک‌سازی اجباری. این سیستم‌ها با سادگی، مقرون به صرفه بودن، ایمنی الکتریکی، فشردگی، مقاومت در برابر نشتی و نیازهای تعمیر و نگهداری پایین مشخص می‌شوند. درحالی‌که خنک‌سازی طبیعی در شرایط خاص کافی بود، اما برای محیط‌های با دمای بالا، ماژول‌های باتری بزرگ‌تر و چرخه‌های شارژ-دشارژ افزایش یافته کافی نبود. برای رفع این محدودیت‌ها، از خنک‌سازی هوای اجباری استفاده شد که اغلب شامل نصب فن‌ها، کانال‌های جریان هوا، سیستم‌های پره‌ای و پیشرفت‌های مشابه می‌شد [4].

طراحی پیکربندی‌های خنک‌کننده هوا با در نظر گرفتن مشخصات ماژول باتری مانند اندازه و ظرفیت انجام شده است. شکل 2 هندسه کانال‌های مختلف جریان هوا را نشان می‌دهد. این نوع پیکربندی‌ها قبلاً برای سلول‌های مستطیلی با منشوری انجام شده است [12]. هدف اصلی نظارت بر تغییرات دمای سلول به دلیل تفاوت در تنظیمات جریان هوا، به ویژه تحت تأثیر همرفت اجباری بود. این مشاهدات در حالی انجام شد که یک منطقه ورودی هوای ثابت بدون توجه به زمان تماس و منطقه خروجی هوا حفظ شد [1].



شکل 2 پیکربندی‌های خنک‌کننده هوا از شکل‌های (الف) هندسه Z، (ب) هندسه تک ورودی- تک خروجی، (ج) هندسه U و (د) هندسه تک ورودی- دو خروجی [6]

شکل 3 تنها یک بسته باتری لیتیوم یون را نشان می‌دهد که از سیستم خنک‌کننده هوا استفاده می‌کند. سیستم خنک‌کننده برای هوای سرد طراحی شده است. جریان ورودی به بسته باتری از طریق مینفولد ورودی در سمت چپ

موتورهای احتراق داخلی به وسایل نقلیه الکتریکی می‌تواند به عنوان یک گام مهم به سمت فناوری وسایل نقلیه الکتریکی [8] تلقی شود. علاوه بر این، تعداد خودروهای برقی در جاده‌ها در سطح جهان از حدود 1 میلیون خودرو در سال 2014 به حدود 7.2 میلیون خودرو در سال 2019 افزایش یافت. کارشناسان پیش‌بینی می‌کنند تا سال 2030 به 116 میلیون خودروی برقی برسد [9]. باتری‌های لیتیوم یونی به دلیل مزایای مختلف از جمله چگالی انرژی بالا نسبت به وزن، ظرفیت ذخیره سازی انرژی قابل توجه، طول عمر طولانی، تخلیه خودکار کوچک، ابعاد جمع و جور، به انتخاب پیشرو در بازار ذخیره سازی انرژی صنعت خودروهای الکتریکی تبدیل شده‌اند [9].

2- طبقه بندی روش‌های کنترل دما و خنک‌سازی سیستم

با توجه به روش‌هایی که تاکنون در مقالات مختلف ارائه شده‌اند، تبرید توسط هوا، تبرید توسط مایع، لوله ی حرارتی، سرمایش توسط یخچال، سرمایش ترموالکتریک و مواد تغییر فاز دهنده، انواع مختلف کنترل دما محسوب می‌شوند. در جدول 1، برای هر کدام از این روش‌ها مثال‌هایی آورده شده است. بسته به شرایط محیطی، ایمنی و هزینه عملیاتی، بهترین روش باید گزینش شود. ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش معمولاً استفاده از هوا می‌باشد که ضریب انتقال حرارت کمی دارد. مایعات نسبت به هوا از ضریب انتقال حرارت بالاتری برخوردار هستند. خنک‌سازی با استفاده از مایعات به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌پذیرد [10].

جدول 1 انواع سیستم کنترل دما [10-11]

روش خنک‌کاری	نوع	کاربرد
خنک‌سازی توسط هوا	جابجایی طبیعی	وسایل الکترونیکی با توان کم
	جابجایی اجباری	وسایل الکترونیکی با توان کم
	هیت سینک	چیپ برد میکرو الکترونیک
خنک‌سازی توسط مایعات	غوطه ور شدن	وسایل الکترونیکی
	جوشش استخری	
	جت مایع	وسایل الکترونیکی با توان زیاد
	اسپری	چیپ برد با توان بالا
لوله‌های حرارتی	مستقیم و غیر مستقیم	توان حرارتی بالا
تبرید یخچالی	توان بالا	آبینه لیزری
تبرید ترموالکتریک	تک مرحله ای و چند مرحله ای	دستگاه عملیات پالس

3- انواع استراتژی‌های خنک‌کاری باتری

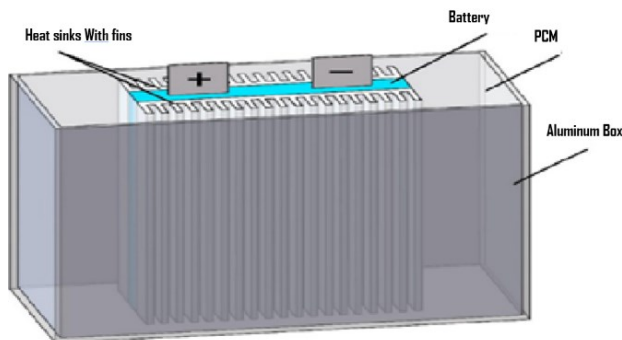
به طور کلی خنک‌کاری باتری‌ها به روش‌های زیر انجام می‌گیرد [11]:

فعال - غیرفعال - ترکیبی

در این روش از سیالی استفاده می‌شود که برای خنک‌کاری نیازی به انرژی مکانیکی ندارد. در این حالت می‌توان از مواد تغییر فاز دهنده، روغن گلیسیرین، نانو سیال و مانند آن جهت خنک‌کاری استفاده کرد.

3-2-1- بسته باتری لیتیوم یون همراه با مواد تغییر فاز دهنده

در شکل 5 شماتیک خنک‌کاری باتری مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده نشان داده شده است [16].



شکل 5 تصویر شماتیک روش خنک‌کاری مواد تغییر فاز [16]

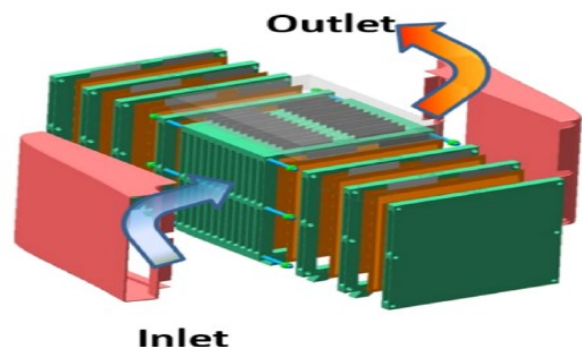
3-3- روش ترکیبی

در حالت سوم نیز از هر دو روش می‌توان بنا بر شرایط مختلف استفاده کرد. استفاده از هر روش خنک‌کاری بسته به شرایط موجود متفاوت خواهد بود. شکل 6 نحوه گرمایش و سرمایش یک نمونه باتری به صورت ترکیبی از مواد تغییر فاز دهنده و هوا را نشان می‌دهد. در این شکل، پیکربندی باتری یک نمونه خودرو فورد اسکپ نشان داده شده است که مدیریت حرارتی آن هم با استفاده از هوا، هم با کمک مواد تغییر فاز دهنده (در اینجا گرافیت)، و هم با لایه‌های بسیار نازک مس انجام می‌شود [17]. حالت ترکیبی نیز به صورت هیبرید خنک‌کننده فعال - غیرفعال خواهد بود و شکل 6 پیکربندی قسمتی از مجموعه باتری خودرو فورد اسکپ را نشان می‌دهد که از سیستم مدیریت حرارتی هیبرید (هوا و تغییر فاز دهنده گرافیت) بهبود یافته با الیاف نانوئی (مس) بهره می‌برد.



شکل 6 خنک‌کاری باتری خودرو فورد اسکپ به روش هیبرید [17]

می‌باشد. سپس جریان هوا به شکاف‌های بین سلول‌های باتری منشوری در پشت باتری منحرف می‌شود. شکاف‌ها توسط دو سلول باتری مجاور محدود شده‌اند [13]. همانطور که هوای خنک‌کننده از طریق شکاف جریان می‌یابد، مقداری از گرمای تولید شده توسط سلول‌های باتری و جریان هوای خنک‌کننده مستقل شده و سپس هوای خروجی در مینفولد خروجی هوا (در سمت راست) جمع‌آوری می‌شود [13]. این سیستم برای توزیع یکنواخت جریان هوای خنک‌کننده در هر شکاف طراحی شده است. به عنوان مثال نرخ جریان هوای خنک‌کننده در تمام شکاف‌ها یکنواخت است [14].

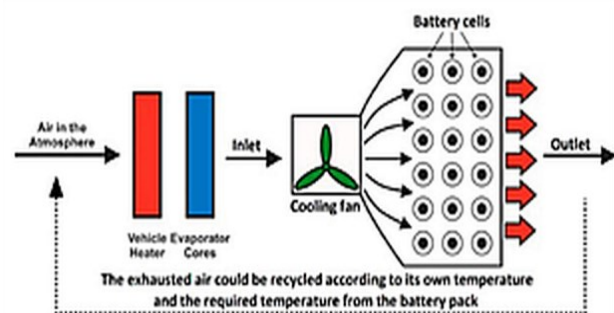


شکل 3 شماتیک یک بسته لیتیوم یون با سیستم خنک‌کننده هوا [13]

3-1-2- بررسی جامع سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری برای وسایل نقلیه

الکتریکی

شکل 4 سیستم خنک‌کننده فعال را نشان می‌دهد. در سیستم خنک‌کننده فعال، از دمنده‌ها در ورودی یا خروجی برای دفع گرمای اضافی و توزیع بهتر دما استفاده می‌شود. اگرچه دارای معایبی مانند نویز و مصرف انرژی اضافی است، اما سیستم خنک‌کننده هوای فعال به دلیل عملکرد و قابلیت اطمینان در اکثر بسته‌های باتری ترجیح داده می‌شود. پارک و همکاران سیستم خنک‌کننده معمولی با هوا را برای دستیابی به سیستم خنک‌کننده با عملکرد بهتر طراحی کردند [13].



شکل 4 نمودار شماتیک خنک‌کننده هوای فعال [15]

3-2- روش غیر فعال

حالتی به حالت دیگر در محدوده دمایی خاص ذخیره و آزاد کنند. در مواد تغییر فاز دهنده‌های ادغام شده در بسته باتری برای جذب و انتشار گرما در طول چرخه شارژ و دشارژ، به تنظیم دمای باتری کمک می‌کند [24].

موم پارافین، یک ماده انتقال فاز آلی، به دلیل عدم خوردگی، گرمای نهان بالا و پایداری بالا، در زمینه اتلاف گرما انتخاب شده است [25]. رسانایی حرارتی موم پارافین بسیار پایین است و با افزودن مواد تقویت شده نانو مانند گرافیت منبسط شده، فوم‌های فلزی، نانو لوله‌های کربنی چند جداره، فوم‌های نیکل افزایش می‌یابد [26]. یک ماده سبک با توانایی مکانیکی و حرارتی برتر، فوم فلز است که به دلیل پیچیده بودن در انتقال حرارت عملکرد بهتری دارد [27].

در جدول 2 برخی از ویژگی‌های انواع روش‌های خنک‌کاری مانند عمر، هزینه، راندمان، توزیع دما، استفاده و نگهداری با یکدیگر مقایسه شده است که روش‌های هوا خنک، لوله حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده و صفحه سرد دارای طول عمر بالای 20 سال می‌باشند. در این بین مواد تغییر دهنده به دلیل راحتی در استفاده و نگهداری آسان و توزیع دما یکنواخت و راندمان و اثربخشی زیاد و هزینه سالانه کم بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد [28].

چهار نوع سیستم مدیریت حرارتی زیر بیشتر بر روی محیط‌های کاری مختلف اتلاف گرما ایجاد می‌شوند. خنک کننده هوا یک استراتژی مدیریت دمای باتری است که از هوای محیط برای مدیریت دمای باتری استفاده می‌کند. در این روش فن‌های سیستم‌های تهویه هوا را روی سلول‌های باتری هدایت می‌کنند تا گرما را از بین ببرند. سیستم‌های خنک کننده هوا می‌توانند غیرفعال (با استفاده از فن‌ها یا دمنده‌ها) یا فعال (با استفاده از جریان هوای طبیعی) باشند [18، 19، 3]. خنک کننده مایع به دلیل راندمان بالای خود در اتلاف گرما شناخته شده است که باعث می‌شود در حفظ دمای باتری پایدار در شرایط مختلف رانندگی و شارژ موثر باشد. به ویژه برای مدیریت نوسانات دما در هنگام شارژ سریع یا سناریوهای استفاده شدید مفید است. با این حال، سیستم‌های خنک‌کننده مایع ممکن است وزن و پیچیدگی را به بسته باتری اضافه کنند [20-22].

خنک‌کننده لوله‌های حرارتی یکی دیگر از استراتژی‌های موثر مدیریت حرارتی باتری است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. لوله‌های حرارتی، دستگاه‌های انتقال حرارت غیرفعال هستند که می‌توانند گرما را با استفاده از اصول تغییر فاز به طور موثر از یک مکان به مکان دیگر منتقل کنند [23]. مواد تغییر فاز موادی هستند که می‌توانند انرژی حرارتی را با تغییر از

جدول 2 مقایسه انواع روش‌های خنک‌کاری [28]

عمر	هوا خنک	سیال خنک	لوله حرارتی	مواد تغییر فاز دهنده	ترموالکتریک	صفحه سرد
	20 سال >=	3-5 سال	20 سال >=	20 سال >=	1-3 سال	20 سال >=
راحتی در استفاده	آسان	سخت	متوسط	آسان	متوسط	متوسط
نگهداری	آسان	سخت	متوسط	آسان	سخت	متوسط
توزیع دما	غیر یکنواخت	یکنواخت	متوسط	یکنواخت	متوسط	متوسط
راندمان	کم	زیاد	زیاد	زیاد	کم	متوسط
اثربخشی	کم	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط
هزینه سالانه	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط
هزینه اولیه	کم	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد

همانطور که در شکل 7 می‌بینید مواد تغییر فاز دهنده‌ها را می‌توان بر اساس تغییر حالت در زمان دریافت انرژی و تغییر فاز به سه دسته مایع - جامد، مایع - گاز و جامد - جامد تقسیم بندی کرد؛ در میان سه فرم موجود

4- مواد تغییر فاز دهنده

یکی از روش‌های نوین برای کنترل دمای باتری، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است که به حفظ دما در محدوده عملکرد بهینه کمک می‌کند [29]. در مطالعه‌ای که توسط عزیز باباپور و همکارانش در سال ۱۳۹۲ انجام شده است، عملکرد مواد تغییر فاز دهنده (پارافین) به عنوان جاذب گرما مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که ماده در حال تغییر فاز با جذب حرارت باتری، از افزایش بیش از حد دما حتی در نرخ‌های بالای دشارژ جلوگیری کرده و به بهبود عملکرد باتری کمک می‌کند [29].

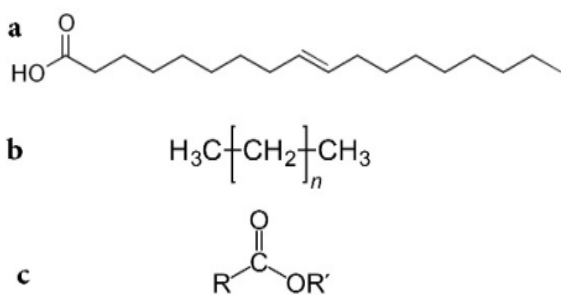
آن‌ها مواد تغییر فاز دهنده مایع - جامد پرکاربردترین هستند؛ که به سه دسته مواد آلی (پارافین و اسیدهای چرب)، مواد معدنی (نمک‌های هیدرات و فلزات) و یوتکتیک تقسیم می‌شوند [30]. یوتکتیک‌ها دسته‌ای از مواد هستند که از ترکیب دو یا چند مواد تغییر فاز دهنده که دمای ذوب و انجماد هماهنگ، متقارن و بدون تفکیکی را دارا هستند؛ به دست آمده‌اند [31]. هرکدام از مواد تغییر فاز دهنده‌ها دارای ویژگی‌ها، نقاط قوت و ضعف خاصی هستند که در

ماتریس‌های فلزی و کپسوله‌کردن پارافین، اخیراً با پیشرفت تکنولوژی نانو می‌توان از پراکنده‌کردن نانوذرات در پارافین به عنوان راه حلی برای افزایش هدایت حرارتی آن استفاده کرد [34].

مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به چهار دسته مهم پارافین‌ها و اسیدهای چرب، مواد جاذب رطوبت، مواد آلی و مواد ترکیبی ترسیم کرد. پارافین‌ها دمای جوی بالایی دارند، خواص شیمیایی نسبتاً ثابتی دارند، غیرسمی هستند و می‌توان آن‌ها را بازیافت کرد اما طی فرایند گذار (تغییر فاز)، تغییر حجم نسبتاً بالایی را تجربه می‌کنند که نقطه ضعف اصلی آن‌ها به شمار می‌رود [25].

4-1- مواد تغییر فاز دهنده‌های آلی

مواد تغییر فاز دهنده‌های آلی دسته مواد طبیعی هستند که در طبیعت یافت می‌شوند و بیشتر آن‌ها را زنجیره‌های هیدروکربن‌ها تشکیل می‌دهند. در میان مواد آلی غیر پارافینی اسیدهای چرب و استرها، مشهورترین این مواد را تشکیل می‌دهند. در شکل 8 شماتیک ساختاری این مواد نشان داده شده است [28]. از طرفی پارافین‌ها از یک مخلوط آلکان با ساختار $\text{CH}_3 - [\text{CH}_2]_n - \text{CH}_3$ تشکیل شده‌اند. در پارافین‌ها با افزایش طول زنجیره CH_3 دمای تغییر فاز و گرمای نهان افزایش می‌یابد. به این ترتیب دمای تغییر فاز آن‌ها می‌تواند از 12 تا 71 سانتی‌گراد درجه تغییر کند و گرمای نهان آن نیز بر اساس طول زنجیره متفاوت است. در میان ویژگی‌های این نوع مواد تغییر فاز دهنده می‌توان اشاره به این مورد کرد که این مواد قادر به ذوب و انجماد مداوم بدون تخریب یا جدایش فازهایشان هستند. همچنین این مواد پایداری شیمیایی بالایی دارند، مشکل فوق سرمایش ندارد، خورنده نیستند و قابلیت بازیافت دارند؛ اما رسانایی حرارتی کمی را دارا هستند (معمولاً کمتر از $0.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)، قابلیت اشتعال داشته و تغییر حجم زیادی نیز دارند [35].



شکل 8 شماتیک ساختاری اسیدهای چرب، آلکان‌ها، استرها [35]

4-2- مواد تغییر فاز دهنده‌های معدنی

مواد تغییر فاز دهنده‌های معدنی معمولاً ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت بالاتر در جرم برابر، اشتعال پذیری کمتر و قیمت مناسب‌تری در مقابل مواد تغییر فاز دهنده‌های آلی دارند؛ اما این مواد دارای مشکل خورنده بودن، جدایش فازی و فوق سرمایش هستند که ویژگی این مواد را تحت الشعاع خود قرار داده است.

ادامه تلاش می‌شود ویژگی‌های هر کدام و موضوعات پیرامون آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

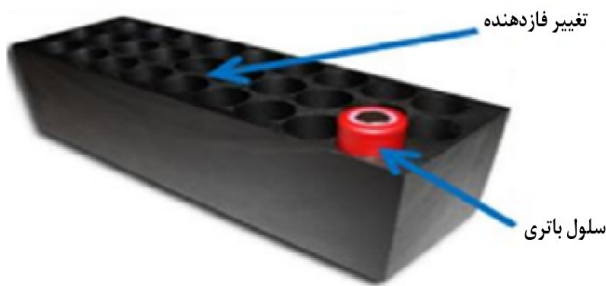


شکل 7 شماتیک دسته بندی فناوری‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی [28]

یکی از مهم‌ترین روش‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده است. موادی که در مواقع لزوم تغییر فاز می‌دهند، انرژی را در شکل‌های مختلف در خود ذخیره کرده و در مواقع لزوم آزاد می‌کنند. این مواد با اثراتی مانند افزایش ضریب انتقال حرارت، افزایش ظرفیت گرمایی، پایداری حرارتی و شیمیایی موجب ذخیره سازی انرژی حرارتی می‌شوند. فناوری نانو و نانومواد در این بین با قابلیت جذب و ذخیره‌ی بالای انرژی حرارتی از روش‌های نوین این فناوری است [32].

همانطور که در شکل 9 می‌بینید مواد تغییر فاز دهنده، ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرایند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ نماید [33]. مواد زیادی به عنوان ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌ی انرژی گرمایی به کار برده شده‌اند که در میان آن‌ها، واکس‌های پارافینی به دلیل داشتن گرمای نهان بالا، فشاربخار پایین، پایداری شیمیایی، بی‌اثر بودن و سائز بلوری گزینه مناسبی برای کاربرد به عنوان مواد تغییر فاز دهنده هستند.

پارافین‌ها و پلیمرها عموماً هدایت حرارتی پایینی دارند، بنابراین افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده‌ها برای بهبود انتقال حرارت یا برای مبادله حرارت بین مواد تغییر فاز دهنده و محیط مورد نیاز است. راه‌های بسیار زیادی برای افزایش هدایت حرارتی پارافین وجود دارد مثل قراردادن فین در آن،



شکل 10 مدیریت گرمایی با مواد تغییر فاز دهنده [41]

مواد تغییر فاز دهنده را بر اساس محدوده درجه حرارت که در آن ۲ انتقال

فاز رخ می‌دهد، می‌توان به ۳ گروه اصلی تقسیم کرد:

- 1- دمای پایین مواد تغییر فاز دهنده‌ها با انتقال فاز در زیر دمای 15 درجه سانتی‌گراد که معمولاً در تهویه هوا و صنایع غذایی استفاده می‌شود.
- 2- دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده‌ها با انتقال فاز در محدوده دمایی 15-90 درجه سانتی‌گراد با کاربردهای خورشیدی، پزشکی، الکترونیک و ذخیره انرژی، محبوب‌ترین گروه است.

3- دمای بالا مواد تغییر فاز دهنده‌ها با انتقال فاز بالای 90 درجه سانتی‌گراد عمدتاً در صنعت و کاربردهای هوا و فضا به کار می‌رود [42].

در طراحی سیستم‌های ذخیره انرژی که بر مبنای مواد تغییر فاز دهنده عمل می‌کنند، بایستی موارد زیر در نظر گرفته شود:

- ماده تغییر فاز دهنده مناسب با دمای ذوب مورد نظر
- ظرفیت گرمایی ویژه بالا و هدایت حرارتی بالا
- تغییر حجم کم در طول تغییر فاز
- غیر سمی بودن، غیر قابل اشتعال بودن و غیر انفجاری بودن
- در دسترس بودن و ارزان بودن [43].

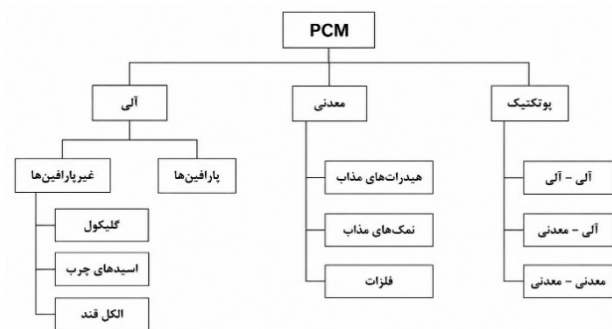
5-1- دماهای ذوب و آنتالپی‌های ذوب برای مواد تغییر فاز دهنده‌ها

به دلیل تنوع بالای مواد تغییر فاز دهنده‌ها می‌توان آن‌ها را در بازه‌های بسیار بالای دمایی مورد استفاده قرار داد و عملاً بسته به شرایط کاری می‌توان از مواد مختلفی با دمای ذوب مختلفی استفاده کرد. در شکل 11 نمودار دماهای ذوب مواد مختلف نشان داده شده است. برای انتخاب مواد فاز دهنده مناسب برای کار و فعالیت مورد نظر می‌بایست پارامترهای بیشتری را مدنظر قرار داد [44].

از مشهورترین مواد این گروه می‌توان به نمک هیدراته و محلول‌های نمک - فلز اشاره کرد که همچنان نمک هیدراته مشهورتر و پرکاربردتر در فرایندهای ذخیره سازی انرژی حرارتی هستند [36].

4-3- مواد تغییر فاز دهنده‌های یوتکتیک

در این میان، مواد تغییر فاز دهنده‌های یوتکتیک به واسطه ترکیب شدن دو یا چند ماده و تشکیل یک ماده نهایی، می‌توانند ویژگی‌های کلیدی را ارائه دهند. این مواد معمولاً دارای نقطه ذوب و انجماد متقارن، بدون تفکیک فازی و با پایداری بالا هستند [37]. در طی فرایند انجماد، مواد تشکیل دهنده آن همگی باهم یک کریستال واحد را تشکیل می‌دهند. جدا شدن اجزای سازنده این مواد بسیار بعید است به این دلیل که در زمان فرایند انجماد، کریستال یکپارچه تشکیل می‌دهند و همچنین بدون تفکیک فاز این فرایند را انجام می‌دهند. همچنین در طول فرایند ذوب شدن، تمامی اجزا به طور یکنواخت به مایع تبدیل می‌شوند [38].



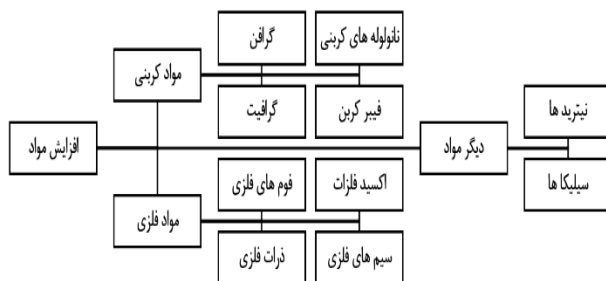
شکل 9 تقسیم بندی انواع مواد تغییر فاز دهنده‌ها [39]

5- کنترل دمای باتری با مواد تغییر فاز دهنده

سعید الحالج و همکاران تحقیقات گسترده‌ای بر روی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده جهت مدیریت گرما در باتری‌های لیتیوم انجام دادند [40]. سیستم مورد استفاده در آزمایشات آن‌ها شامل باتری استوانه‌ای و محفظه مکعب مستطیلی بود. مطابق شکل 10، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بدون نیاز به تغییر در طراحی سیستم باتری، می‌توان دمای آن را کنترل کرد.

مطالعات آن‌ها نشان داد که دمای باتری استوانه‌ای از حد مجاز بالاتر نمی‌رود. با استفاده از این سیستم بدون نیاز به تجهیزات اضافی و به صورت غیر فعال، دمای باتری‌ها کنترل می‌شود. با عایق سازی اطراف مواد تغییر فاز دهنده و با توان 1000 آمپر ساعت، به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، دمای سطح باتری 8 درجه کمتر از حالتی خواهد بود که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمی‌شود. آن‌ها علاوه بر تحقیق بر روی مواد تغییر فاز دهنده، تغییرات آنتروپی در زمان شارژ و دشارژ را برای باتری‌های پاناسونیک اندازه گیری کردند. در این آزمایش‌ها، باتری‌ها با سرعت 6 برابر ظرفیت و در دمای 35 درجه سانتی‌گراد تخلیه شدند.

- 1- ساخت کامپوزیت‌های مواد تغییر فاز دهنده‌ها همراه با فلزات مختلف با گرافیت‌های ویژه برای افزایش انتقال حرارت
 - 2- استفاده از مواد فلزی به شکل کره، صفحه، پروانه و باله برای افزایش انتقال حرارت در داخل مواد فاز دهنده‌ها
 - 3- استفاده از نانو مواد در ساختار مواد تغییر فاز دهنده‌ها
- نانو موادی که می‌تواند در ساختار مواد تغییر فاز دهنده‌ها مورد استفاده قرار گیرد شامل انواع نانو کربن‌ها (انواع نانو لوله‌های کربنی)، فلزات پایدار (طلا و مس)، اکسید فلزات (سیلیس، آلومینا، زیرکونیوم)، نیتريد‌های فلزی (آلومینوم نیتريد) و هستند [45]. در شکل 13 روش‌های افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده‌ها از طریق افزودن مواد به ساختارشان نشان داده شده است [45].



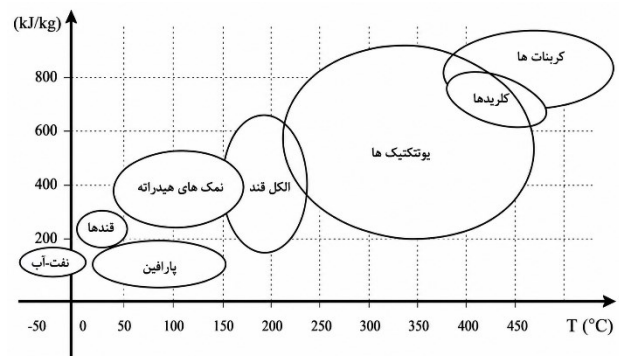
شکل 13 روش‌های افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده‌ها از طریق افزایش مواد به ساختار آن‌ها [45]

7-1- بهبود خواص ترموفیزیکی تغییر فاز دهنده‌ها با افزودن مواد گوناگون به ساختمان ماتریس آنان

امروزه، افزودنی‌های بسیاری به ساختمان کامپوزیت تغییر فاز دهنده اضافه می‌شود تا خواص انتقال حرارت، ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی آن‌ها بهبود یابد. صمیمی و همکاران [46] به این نتیجه مهم رسیدند که وجود الیاف کربن در ساختمان ماتریس پارافینی، باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی تغییر فاز دهنده شده و توزیع دما را یکنواخت‌تر می‌کند.

7-2- تأثیر وجود سیستم هیبریدی در هدایت حرارتی

تأثیر وجود سیستم هیبریدی (فوم فلزی-پارافین) در مقابل پارافین خالص بر فرآیند خنک‌سازی باتری در این بخش در نظر گرفته شده است. در شکل 14، دمای سطح باتری برای هر دو سیستم با و بدون فوم فلزی تحت شرایط پایه، یعنی عدد رینولدز ۶۰۰ و هیت سینک بدون پره برای نانوسیال اکسید نقره، این خنک‌کننده در این دو آزمایش دوغاب نانوسیال اکسید نقره است [47].

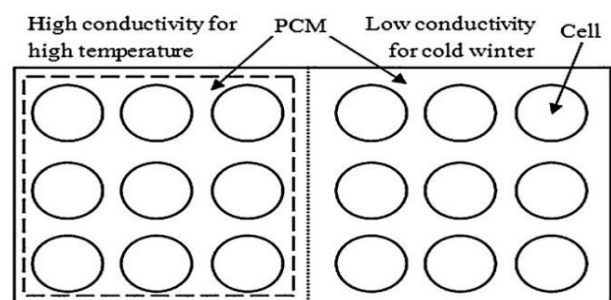


شکل 11 دماهای ذوب و آنتالپی‌های ذوب برای مواد تغییر فاز دهنده‌ها [44]

6- کاربرد تغییر فاز دهنده‌ها

مواد تغییر فاز دهنده با توجه به دمای تغییر حالت شان کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. موادی که زیر 15 درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، برای خنک کردن و تهویه هوای اتاق قابلیت استفاده دارند، موادی که بالای 90 درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، برای کاهش دما در جاهایی که دما ممکن است به طور ناگهانی بالا برود (مثل پردازنده مرکزی رایانه) کاربرد گسترده دارند و سایر تغییر فاز دهنده‌ها که دمای ذوب‌شان بین این دو مدار است برای ذخیره سازی انرژی خورشیدی به کار می‌روند [43].

تغییر فاز دهنده‌ها برای سرد و گرم کردن در مقیاس کوچک نیز کاربرد ویژه‌ای دارند، به عنوان مثال می‌توان تری هیدرات استات سدیم که در اجاق‌های گرم کننده غذا به کار می‌رود را نام برد. همان‌طور که در شکل 12 می‌بینید کاربرد دیگر این دسته مواد، مدیریت حرارتی باتری و کمک به خنک‌کاری بهتر و بیشتر باتری است [43].



شکل 12 خنک‌کاری باتری با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده [43]

7- هدایت حرارتی

یکی از عوامل محدودکننده در استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، مشکل هدایت حرارتی پایین آن‌هاست. این ویژگی می‌تواند در برخی شرایط استفاده از آن‌ها را به عنوان دستگاه‌های خنک‌کننده محدود و غیرعملی کند. برای برطرف کردن این مهم، سه روش عمده پیشنهاد شده است:

شکل 15 شماتیک فرآیند خنک‌سازی باتری در سه مرحله [47]

8- برخی از نمونه‌های ساخته شده و آزمایش شده بسته باتری لیتیوم

یون

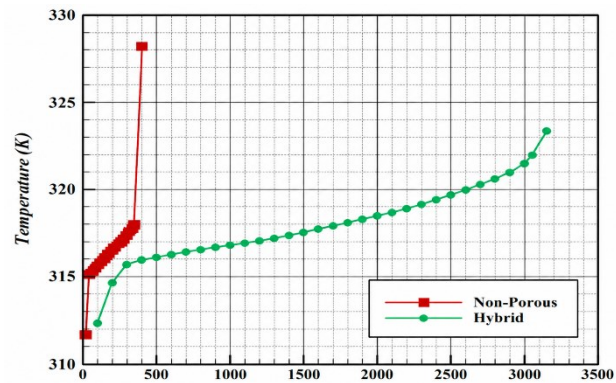
موم پارافین و مواد تغییر فاز کامپوزیت برای ساخت یون لیتیوم شش ضلعی و دوزنقه‌ای شکل استفاده شده‌اند که در شکل 16 نشان داده شده است. در بسته باتری از آنجایی که رسانایی حرارتی موم پارافین بسیار کم است، برای افزایش رسانایی حرارتی، مواد مبتنی بر پودر گرافیت کربن به آن اضافه می‌شود. این بررسی نشان داد که دمای محیط 28 تا 32 درجه سانتی‌گراد، آزمایش‌ها با سه نرخ تخلیه مختلف، شامل 1، 2 و 3 درجه سانتی‌گراد، انجام شد. در تمام نرخ‌های تخلیه، مواد تغییر فاز دهنده مبتنی بر کربن با بسته باتری شش ضلعی عملکرد خوبی را نشان داده‌است [48].

آزمایش فعلی از سلول‌های لیتیوم یونی استوانه‌ای ساسونگ 18650 برای تولید یک بسته باتری دوزنقه‌ای و شش ضلعی استفاده کرد که در شکل 16 آورده شده است. باتری‌های لیتیوم یون دارای قطر 18 میلی‌متر و ارتفاع 65 میلی‌متر هستند. جدول 3 مشخصات ماژول باتری را نشان می‌دهد. شش ماژول، هر کدام دارای چهار سلول، دوبسته باتری متفاوت را تشکیل می‌دهند. 24 سلول باتری لیتیوم یون با اشکال استوانه‌ای در شش سری و چهار آرایش موازی به هم متصل شده‌اند. ورما و همکاران چندین ضخامت 3، 7 و 9 میلی‌متر را آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که 3 میلی‌متر ضخامت ایده آل برای پایین آوردن بالاترین دمای بسته باتری است [49]. در بالا و پایین بسته باتری دوزنقه‌ای، صفحات ساخته شده از چوب سخت، دایره‌های ورق آلومینیومی به ضخامت 2 میلی‌متر را نگه می‌دارند. آزمایش تجربی در شرایط جوی 28 درجه سانتی‌گراد انجام شد.

جدول 3 مشخصات ماژول باتری [49]

مشخصات	
18650	نوع باتری
10 Ah	جریان ماژول
24 V	ولتاژ ماژول
1 C	حداکثر نرخ شارژ
3 C	حداکثر میزان تخلیه

سلول‌های باتری لیتیوم یون با ظرفیت 24 ولت و 10 آمپر ساعت، بسته باتری را تشکیل می‌دهند که به شکل دوزنقه است. عملکرد خنک کننده یک ماژول باتری دوزنقه‌ای در چندین نرخ تخلیه 1، 2 و 3 سانتی‌گراد ارزیابی می‌شود. برای اندازه گیری دما، ترموکوپل به ماژول باتری متصل می‌شود که به عنوان سنسور دما عمل می‌کند. هنگامی که مواد تغییر فاز در بسته باتری دوزنقه‌ای قرار دارند، رفتار خنک‌کننده تحت بارهای مختلف ارزیابی می‌شود.

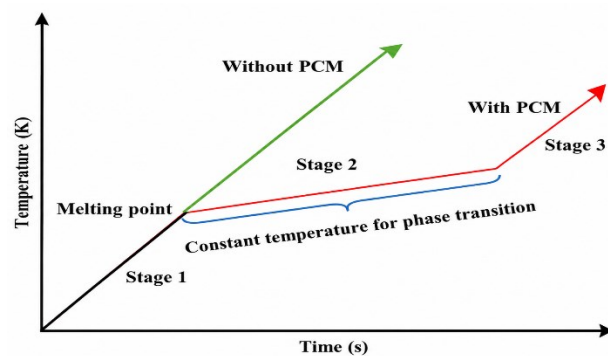


شکل 14 تاثیر فوم فلزی و موم پارافین بر دمای باتری [47]

انتقال حرارت با سرعت کم در موم پارافین به دلیل رسانایی حرارتی پایین آن (به عنوان مثال $k = 0.205 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) رخ می‌دهد. بنابراین، ناحیه‌ای از مواد تغییر فاز دهنده که در ابتدا ذوب می‌شود (یعنی مناطق مجاور سلول‌های باتری) به عنوان یک هیت سینک عمل کرده و دما را نزدیک به نقطه ذوب ثابت نگه می‌دارد [47].

در نتیجه، فرآیند ذوب کل مواد تغییر فاز دهنده به دلیل اهمیت کمبود هدایت حرارتی به شدت به تعویق می‌افتد. نقش عایق مواد تغییر فاز دهنده مایع در نهایت، در تست بدون فوم مس با گذشت زمان حداکثر دمای باتری به تدریج تا 56 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل 15 می‌بینید به دلیل همرفت طبیعی در پارافین، مایع سیستم هیبرید (فوم فلزی-پارافین) به عنوان جایگزینی برای موم پارافین عمل می‌کند که می‌تواند باتری را برای مدت طولانی‌تری در شرایط ایمن نگه‌دارد. ساختار مولکولی فوم فلزی کمک می‌کند گرما به طور مساوی در داخل باتری توزیع شود. در نتیجه زمان رسیدن به حداکثر دما به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که به نوبه خود عمر باتری را افزایش می‌دهد. در نهایت انباشت انرژی حرارتی در ساختار مواد تغییر فاز دهنده باعث شکست سیستم مدیریت حرارتی باتری می‌شود [47].

دمای باتری در حال افزایش است و شرایط فرار اجتناب ناپذیر است. مقاومت داخلی باتری به طور قابل توجهی در پایان فرآیند تخلیه افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به خرابی باتری می‌شود [47].



5- مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان بسته به نیاز کاری و سیستم مورد نظر، در دامنه دماهای مختلف انتخاب کرد. مواد تغییر فاز دهنده در انواع مختلفی با نقاط ذوب و انجماد متنوع وجود دارند که امکان انتخاب مواد مناسب برای هر سیستم و شرایط دمایی خاص را فراهم می‌آورد.

6- مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند مدیریت دمایی را در باتری‌ها ایجاد کرده و تغییرات دمایی را به حداقل برسانند. این مواد با جذب و ذخیره حرارت اضافی و آزادسازی آن در زمان نیاز، به حفظ دما در محدوده‌ای که عملکرد بهینه باتری حفظ شود، کمک می‌کنند.

7- نتایج حاصل از استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای مدیریت حرارتی باتری‌ها، به‌طور کلی مطلوب‌تر از استفاده از مایعات یا هوا به عنوان سردساز است. مقایسه‌ها نشان داده‌اند که مواد تغییر فاز دهنده به دلیل توانایی‌های خاص خود در مدیریت حرارتی، عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های خنک‌کننده مبتنی بر مایعات یا هوا ارائه می‌دهند، که این نتایج در مقالات مختلف علمی تأیید شده است.

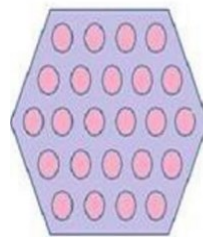
10- مراجع

- [1] Y. Lai *et al.*, "Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 38, pp. 13039–13049, 2015.
- [2] I. Mokashi, S. A. Khan, N. A. Abdullah, M. H. Bin Azami, and A. Afzal, "Maximum temperature analysis in a Li-ion battery pack cooled by different fluids," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 141, pp. 2555–2571, 2020.
- [3] M. Wang, S. Teng, H. Xi, and Y. Li, "Cooling performance optimization of air-cooled battery thermal management system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 195, p. 117242, 2021.
- [4] P. R. Tete, M. M. Gupta, and S. S. Joshi, "Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review," *J. Energy Storage*, vol. 35, p. 102255, 2021.
- [5] K. Egab and S. K. Oudah, "Thermal management analysis of li-ion battery-based on cooling system using dimples with air fins and perforated fins," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 171, p. 107200, 2022.
- [6] D. B. Ghimire, S. Maharjan, S. Neupane, and A. Uprety, "Parametric study of battery module cooling: Configuration optimization using response curve method," *Results Eng.*, vol. 21, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101729.
- [7] M.-K. Tran, A. DaCosta, A. Mevawalla, S. Panchal, and M. Fowler, "Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA," *Batteries*, vol. 7, no. 3, p. 51, 2021.
- [8] L. Lander, E. Kallitsis, A. Hales, J. S. Edge, A. Korre, and G. Offer, "Cost and carbon footprint reduction of electric vehicle lithium-ion batteries through efficient thermal management," *Appl. Energy*, vol. 289, p. 116737, 2021.
- [9] S. Li *et al.*, "Optimal cell tab design and cooling strategy for cylindrical lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 492, p. 229594, 2021.
- [10] A. G. A. Nnanna, "Application of refrigeration system in electronics cooling," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 18–27, 2006.
- [11] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 106–128, 2016.
- [12] X. Li, J. Zhao, J. Yuan, J. Duan, and C. Liang, "Simulation and analysis of air cooling configurations for a lithium-ion battery pack," *J. Energy Storage*, vol. 35, p. 102270, 2021.
- [13] T. Han and K.-H. Chen, "Assessment of various environmental thermal loads on passenger compartment soak and cool-down analyses," SAE Technical Paper, 2009.

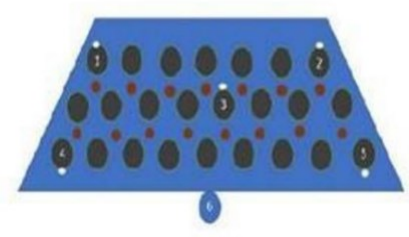
دمای ذوب پارافین واکس 47 درجه سانتی‌گراد است. مشخصات فیزیکی و حرارتی موم پارافین و پودر گرافیت در جدول 4 نشان داده شده است [50].

جدول 4 ویژگی‌های موم پارافین و پودر گرافیت [50]

مشخصات	موم پارافین	گرافیت
دمای محدوده ذوب	47°C	
رسانایی و انرژی گرمایی مواد	226 $\frac{kJ}{kg}$	2/7 $\frac{W}{mK}$
چگالی مواد	802 $\frac{kg}{m^3}$	2/93 $\frac{kg}{m^3}$
گرمای ویژه مواد	2510 $\frac{J}{kgK}$	710 $\frac{J}{kgK}$



الف



ب

شکل 16 شماتیک ماژول باتری شش ضلعی و دوزنقه‌ای [14]

9- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

1- دمای باتری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد و طول عمر باتری است. دمای بالای باتری می‌تواند باعث کاهش عمر مفید و کاهش کارایی آن شود، در حالی که دماهای پایین می‌توانند باعث کاهش توان و عملکرد باتری شوند. بنابراین، کنترل دما به‌طور مستقیم بر روی کارایی و دوام باتری تأثیر می‌گذارد.

2- مدیریت حرارتی در باتری از روش‌های مؤثر برای بهبود عملکرد و طول عمر باتری است و یکی از روش‌های نوین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل توانایی‌شان در جذب و آزادسازی حرارت، به مدیریت حرارتی باتری کمک می‌کنند. این مواد می‌توانند دما را در محدوده مطلوب نگه‌دارند و بهبود قابل توجهی در عملکرد و طول عمر باتری ایجاد کنند.

3- مواد تغییر فاز دهنده در مواقع لزوم تغییر فاز داده و انرژی را در اشکال مختلف ذخیره و آزاد می‌کنند. این ویژگی به کنترل دما و کاهش نوسانات حرارتی کمک می‌کند.

4- مواد تغییر فاز دهنده با افزایش ظرفیت گرمایی، ضریب انتقال حرارت و پایداری حرارتی و شیمیایی، به ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کمک می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده قادرند ظرفیت گرمایی باتری را افزایش دهند و انتقال حرارت را بهبود بخشند، در نتیجه پایداری حرارتی و شیمیایی بهتری فراهم می‌کنند که به بهبود عملکرد و طول عمر باتری‌ها کمک می‌کند.

- Review of Numerical Modeling and Analysis of the Application of Phase Change Materials in Buildings for Energy Consumption Reduction,” in 5th Scientific and Specialized Conference on Renewable, Clean, and Efficient Energies, 2013 (In Persian).
- [34] A. Babapour, F. Karimian, G. Karimi, “Numerical Modeling of the Application of Nano-Phase Change Materials,” in National Conference on Mechanical Engineering, 2013 (In Persian).
- [35] A. K. Pandey *et al.*, “Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 281–323, 2018.
- [36] G. Ferrer, A. Solé, C. Barreneche, I. Martorell, and L. F. Cabeza, “Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 665–685, 2015.
- [37] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, “A review of potential materials for thermal energy storage in building applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 327–349, 2013.
- [38] E. Osterman, V. V. Tyagi, V. Butala, N. A. Rahim, and U. Stritih, “Review of PCM based cooling technologies for buildings,” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 37–49, 2012.
- [39] D. Zhou, C.-Y. Zhao, and Y. Tian, “Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications,” *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [40] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, “Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter,” *J. Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292–307, 2004.
- [41] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: materials and applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, 2004.
- [42] K. Pielichowska and K. Pielichowski, “Phase change materials for thermal energy storage,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 67–123, 2014.
- [43] Z. Rao and S. Wang, “A review of power battery thermal energy management,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4554–4571, 2011.
- [44] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, 2010.
- [45] X. Q. Zhai, X. L. Wang, T. Wang, and R. Z. Wang, “A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 108–120, 2013.
- [46] F. Samimi, A. Babapour, M. Azizi, and G. Karimi, “Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers,” *Energy*, vol. 96, pp. 355–371, 2016.
- [47] M. Kiani, S. Omiddezyani, E. Houshfar, S. R. Miremadi, M. Ashjaee, and A. Mahdavi Nejad, “Lithium-ion battery thermal management system with Al₂O₃/AgO/CuO nanofluids and phase change material,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 180, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115840.
- [48] G. Murali, G. S. N. Sravya, J. Jaya, and V. N. Vamsi, “A review on hybrid thermal management of battery packs and its cooling performance by enhanced PCM,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111513, 2021.
- [49] A. Verma, S. Shashidhara, and D. Rakshit, “A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM),” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 11, pp. 74–83, 2019.
- [50] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, and Y. Hu, “Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 120, pp. 33–41, 2018.
- [14] M. C. Gentry and A. M. Jacobi, “Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 231–242, 1997.
- [15] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, and H. Zhang, “A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 501, p. 230001, 2021.
- [16] P. Ping, R. Peng, D. Kong, G. Chen, and J. Wen, “Investigation on thermal management performance of PCM-fin structure for Li-ion battery module in high-temperature environment,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 176, pp. 131–146, 2018.
- [17] Z. Wang, Z. Zhang, L. Jia, and L. Yang, “Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, pp. 428–436, 2015.
- [18] S. Gocmen, S. Gungor, and E. Cetkin, “Thermal management of electric vehicle battery cells with homogeneous coolant and temperature distribution,” *J. Appl. Phys.*, vol. 127, no. 23, 2020.
- [19] W. Yang, F. Zhou, H. Zhou, Q. Wang, and J. Kong, “Thermal performance of cylindrical lithium-ion battery thermal management system integrated with mini-channel liquid cooling and air cooling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 175, p. 115331, 2020.
- [20] J. Xu, Z. Chen, J. Qin, and P. Minqiang, “A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 203, p. 117871, 2022.
- [21] J. Liu, H. Li, W. Li, J. Shi, H. Wang, and J. Chen, “Thermal characteristics of power battery pack with liquid-based thermal management,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 164, p. 114421, 2020.
- [22] S. Gungor, E. Cetkin, and S. Lorente, “Canopy-to-canopy liquid cooling for the thermal management of lithium-ion batteries, a constructal approach,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 182, p. 121918, 2022.
- [23] H. Behi *et al.*, “Thermal management analysis using heat pipe in the high current discharging of lithium-ion battery in electric vehicles,” *J. Energy Storage*, vol. 32, p. 101893, 2020.
- [24] Y. Huo, X. Pang, and Z. Rao, “Investigation on the effects of temperature equilibrium strategy in battery thermal management using phase change material,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 9, pp. 7660–7673, 2020.
- [25] A. G. Mohammed, K. E. Elfeky, and Q. Wang, “Thermal management evaluation of Li-ion battery employing multiple phase change materials integrated thin heat sinks for hybrid electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 516, p. 230680, 2021.
- [26] J. Yu, H. Li, L. Kong, H. Zhu, Q. Zhu, and H. Wang, “Effects of Nanofilled Particle Forms and Dispersion Modes on Properties of Carbon-Based Energy Storage Composites,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 2020, no. 1, p. 6865497, 2020.
- [27] W. C. Tan, L. H. Saw, F. Yusof, H. S. Thiam, and J. Xuan, “Investigation of functionally graded metal foam thermal management system for solar cell,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 12, pp. 9333–9349, 2020.
- [28] M. M. Kenisarin, “Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review,” *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 553–575, 2014.
- [29] G. Karimi, M. Heravi, A. Babapour, M. Mahmoudi, “Thermal Management in Lithium-Ion Batteries Using Phase Change Materials,” in National Conference on Mechanical Engineering, 2013 (In Persian).
- [30] A. Fallahi, G. Guldentops, M. Tao, S. Granados-Focil, and S. Van Dessel, “Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 1427–1441, 2017.
- [31] S. Keleş, K. Kaygusuz, and A. Sarı, “Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 29, no. 9, pp. 857–870, 2005.
- [32] M. Masoudi, A. Babapour, “A Review of Phase Change Materials as a Valuable Energy Resource,” in 6th Scientific and Specialized Conference on Renewable, Clean, and Efficient Energies, 2014 (In Persian).
- [33] Y. Bakhshoudeh Nia, A. Babapour, M. Bakhshoudeh Nia, “A