

بررسی عددی تأثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بر خنک کاری باتری لیتیوم-یونی خودروهای برقی

در مطالعه حاضر عملکرد روش های مختلف خنک کاری شامل خنک کاری جابجایی آزاد هوا، جابجایی اجباری هوا در حضور چاه حرارتی، جابجایی اجباری هوا به همراه ماده تغییر فاز دهنده پارافین، جابجایی اجباری هوا به همراه پارافین و فوم فلزی و جابجایی اجباری هوا به همراه پارافین، فوم فلزی و پره بر خنک سازی باتری لیتیوم-یون خودروهای برقی با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی شده است. نتایج نشان داد در زمانی که دمای باتری در وضعیت خنک کاری با پارافین خالص از دمای مجاز ۵۵ درجه سلسیوس عبور می کند، برای پارافین با فوم فلزی و پارافین با فوم فلزی و پره، بیشینه دما به ترتیب برابر ۳۹/۳ و ۳۶/۱ درجه سلسیوس است. بنابراین فوم فلزی و فوم فلزی پره دار در مدت زمان مشابه به ترتیب دما را ۲۹٪ و ۳۴٪ نسبت به پارافین خالص کاهش می دهند و حتی پس از طی ۲۱ چرخه کامل با تغییر نرخ حرارت تولیدی نیز دمای بیشینه از دمای مجاز بیشتر نمی شود. در دمای نسبتاً بالا نیز استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه تقویت کننده های رسانندگی باعث می شود تا سیستم خنک کاری هیبریدی نسبت به سیستم خنک کاری جابجایی اجباری-چاه حرارتی کارآمدتر باشد؛ به گونه ای که گستره زمانی مجاز بیشتر از ۱۱ برابر افزایش می یابد.

محمد رضا بابائی^۱

استادیار

قنبر علی شیخ زاده^۲

استاد

محمد عیدیان^۳

کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: خودرو برقی، باتری لیتیوم-یونی، خنک کاری، مواد تغییر فاز دهنده، فوم فلزی

۱- مقدمه

به منظور پاسخگویی به تقاضای توان بالای خودروهای برقی، معمولاً تعداد زیادی باتری باهم به صورت سری و موازی مجموعه می شوند که منجر به افزایش بیش از حد دمای مجموعه باتری شده و در نتیجه موجب

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بادرود، بادرود، ایران، mr.babaei1360@iau.ac.ir

^۲ استاد، گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، sheikhz@kashanu.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران،

mohammadeydiyan8014@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کاهش قابل توجهی در کارکرد و توان تولیدی مجموعه باتری می‌شود [۱]. بنابراین، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه مدیریت حرارتی باتری (BTMS^۱) کارآمد بسیار مهم است. هدف اولیه از طراحی یک سامانه مدیریت حرارتی این است که حرارت تولید شده در یک مجموعه باتری دفع شود و باتری‌ها در محدوده دمای مجاز گیرند و همچنین دمای باتری‌ها یکنواخت شود. چالش اصلی در طراحی یک سامانه مدیریت حرارتی، مصرف انرژی کمتر است، زیرا برای سامانه خنک‌کاری باتری‌ها نیاز به انرژی می‌باشد که باید این انرژی از خود باتری‌ها تامین شود. یک سامانه مدیریت حرارتی می‌تواند از انواع روش‌ها برای دفع گرما استفاده کند که شامل روش‌های فعال مانند جریان هوا یا مایعات برای خنک‌کاری و روش‌های غیرفعال مانند مواد تغییر فازدهنده و پخش‌کننده‌های حرارتی می‌باشد [۲،۳]. در حقیقت به دلیل افزایش پیچیدگی و هزینه بالا در استفاده از تجهیزات، عوامل ایمنی نظیر نشت سیال در جعبه باتری که باعث محدودیت در استفاده از روش‌های فعال می‌شود و همچنین فضای زیاد این تجهیزات، روش‌های دیگری برای کنترل و مدیریت حرارت و دمای مجموعه باتری لیتیوم-یون معرفی شده است. در ادامه به بررسی استفاده از مواد تغییر فازدهنده پرداخته شده است.

به طور کلی، مواد تغییر فازدهنده جهت جذب حرارت باتری‌ها و ذخیره در خود مورد استفاده قرار می‌گیرد. گرما در این مواد ذخیره شده و دما به طور یکنواخت کنترل می‌شود و اختلاف دما بین باتری‌ها کاهش می‌یابد. مواد تغییر فازدهنده به تنهایی هدایت حرارتی پایینی دارند و از افزایش دما جلوگیری می‌کنند ولی توانایی حذف گرمای تولیدی را ندارند. همچنین اکثر مطالعات نشان می‌دهد که اتلافات گرما نمی‌تواند توسط گردش جابجایی آزاد یا اجباری به ویژه در باتری‌های بزرگ، به طور قابل توجهی دفع گردد [۴،۵]. بدین ترتیب، چندین روش وجود دارد تا هدایت حرارتی این مواد را افزایش دهد. پیشرفت‌های ممکن در این زمینه می‌تواند شامل استفاده از فوم فلزی [۶-۱۲]، اضافه کردن پره‌های آلومینیومی بر روی باتری‌ها و استفاده از گرافیت در مواد تغییر فازدهنده باشد. همچنین ترکیب این مواد با روش‌های خنک‌کاری دیگری نظیر خنک‌کاری با هوا یا آب برای حل مشکل محدودیت ذخیره گرما امکان‌پذیر است. مجموعه‌های باتری برای خودروهای هیبریدی نسبت به مجموعه‌های باتری خودروهای الکتریکی دارای ابعاد کوچکتری هستند [۱۳]. برای خودروهای تمام برقی، ترکیب مواد تغییر فازدهنده و خنک‌کاری با هوا یا آب نیز توصیه می‌شود تا گرمای تولید شده باتری‌ها به خوبی حذف شود. دیگر مزیت استفاده از مواد تغییر فازدهنده، استفاده از انواع لایه‌های این مواد بین سلول‌ها برای حفظ دمای مناسب باتری‌ها می‌باشد [۱]. انواع مواد تغییر فازدهنده جامد-مایع و جامد-جامد در مقایسه با انواع مایع-گاز و جامد-گاز بسیار رایج‌تر است؛ زیرا در طی فرایند تبدیل فاز، تغییر حجم کمتری دارند و فرایند کپسوله کردن آنها ساده‌تر است. مواد تغییر فازدهنده مورد استفاده در سامانه‌های خنک‌کننده باتری معمولاً از نوع جامد-مایع آلی با گرمای نهان بالا و نقطه ذوب پایین در حدود ۴۰ درجه سلسیوس هستند [۱۴]. در اکثر سامانه‌های مدیریت حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده، از پارافین استفاده می‌شود که یک جامد آلی نرم و بدون رنگ است [۱۵-۱۴] و معمولاً با موم‌زدایی روغن‌های روان‌کننده مشتق شده از نفت به‌دست می‌آید [۱۶]. به طور معمول مواد تغییر فازدهنده آلی، رسانایی حرارتی ضعیفی دارند [۱۷].

¹ Batteri Thermal Management System (BTMS)

ژانگ و همکاران [۱۸] به طراحی و بهینه‌سازی سیستم مدیریت حرارتی باتری هیبریدی برای خودروهای برقی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی مواد تغییر فازدهنده، ضخامت مواد تغییر فازدهنده، طول لوله حرارتی و سرعت آب ورودی تأثیر قابل توجهی بر حداکثر دما و اختلاف دمای سیستم باتری دارند. همچنین در مقایسه^۱ PL-BTMS اولیه با^۲ PLH-BTMS بهینه شده، مشخص شد که سیستم مدیریت حرارتی بهینه‌شده بهترین توانایی را در اتلاف گرما با حداکثر دمای باتری ۳۰ درجه سلسیوس و حفظ یکنواختی دما در مقایسه با طرح اولیه دارد.

مورالی و همکاران [۱۹] مدیریت حرارتی مجموعه باتری هیبریدی و عملکرد خنک‌کنندگی آن توسط مواد تغییر فازدهنده پیشرفته را بررسی کردند. مطالعات آنها شامل پارامترهای کلیدی مختلفی مانند فاصله باتری‌ها، جرم مواد تغییر فازدهنده، ضخامت مواد تغییر فازدهنده، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت حرارتی موثر بر عملکرد سیستم بود. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن ذرات دارای رسانای حرارتی بالا به مواد تغییر فازدهنده به افزایش رسانایی گرمایی آنها کمک می‌کند. فوم‌های فلزی ساختاری اسکلتی پیوسته با هدایت حرارتی زیاد و استحکام ساختاری بالا دارند. اضافه شدن ذرات دارای رسانای حرارتی بالا به مواد تغییر فازدهنده، که فوم‌های متخلخل با مواد تغییر فازدهنده را ترکیب می‌کند (CPCM^۳)، رسانایی بیشتری را نشان می‌دهد. از آنجاکه اثر خنک‌کاری به وسیله مواد تغییر فازدهنده تا حد زیادی به توانایی جذب حرارت نهان متکی است، بنابراین، عملکرد کنترل دما از مواد تغییر فازدهنده به طور قابل ملاحظه‌ای پس از این که تمام مواد به مایع تبدیل شدند، کاهش خواهد یافت. در نتیجه، برای عملیات شارژ و دشارژ با نرخ‌های بالا و در دراز مدت، نیاز به یک خنک‌کننده دیگر جهت کمک به خنک‌کاری مواد تغییر فازدهنده خواهد بود [۲۰]. بنابراین، هدایت حرارتی مواد تغییر فازدهنده فعلی بایستی از طریق روش‌های مهندسی مانند افزودن پرها [۲۱]، ماتریس گرافیتی، ذرات کربن و فوم‌های فلزی ساخته شده از آلومینیوم و مس [۲۲] افزایش یابد.

خطیب و همکاران [۱۳] یک سامانه مدیریت حرارتی بر اساس مواد تغییر فازدهنده معرفی کردند. نتایج مدل‌سازی حرارتی و آزمایش‌های تجربی این محققان نشان داد که استفاده از سامانه‌های غیرفعال کنترل حرارتی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، دارای عملکرد بهتری نسبت به سامانه‌های فعال مدیریت حرارتی با جریان هوا برای باتری‌های لیتیوم-یون می‌باشند. در آزمایش خطیب و همکاران، از یک مجموعه باتری لیتیوم-یون با دو مدول سلول‌های هجده عددی استوانه‌ای پاناسونیک استفاده شد، افزایش دمای ۴۵ درجه سلسیوس در سلول مرکزی را نشان داد. از نتایج دیگر این شبیه‌سازی این بود که تنها اگر سامانه مدیریت دما، جریان هوا باشد، خطر فرار حرارتی برای باتری‌های لیتیوم-یون خواهد بود. به همین دلیل آنها برای انجام این آزمایش، یک سامانه مدیریت حرارتی غیرفعال با استفاده از پارافین به عنوان یک ماده تغییر فازدهنده طراحی کردند. بعد از تحلیل نتایج شبیه‌سازی، آنها متوجه شدند که این سامانه طراحی شده، به دلیل پایین بودن هدایت حرارتی پارافین و توزیع

^۱PCM-Liquid cooling BTMS

^۲PCM-Liquid-Heat pipe cooling BTMS

^۳Composite PCM

غیریکنواخت دما در داخل سلول، قابلیت تخلیه حرارتی مواد تغییر فازدهنده را ندارد. برای رفع مشکل هدایت حرارتی پایین پارافین، فوم آلومینیوم به مواد تغییر فازدهنده داخل مجموعه اضافه شد. با انجام این کار آنها مشاهده نمودند که هدایت حرارتی مواد، به میزان قابل توجهی افزایش یافت. همچنین دمای باتری‌های لیتیوم-یون تا دمای ۲۵ درجه سلسیوس کاهش یافت. همچنین صباح و همکاران [۱] اثر استفاده از ماده تغییر فازدهنده همراه با استفاده از جریان اجباری هوا بر خنک‌کاری باتری‌های استوانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اگر دمای هوای اطراف ۴۰ درجه سلسیوس باشد، استفاده از جریان اجباری هوا به تنهایی، تأثیر چندانی بر خنک‌کاری باتری ندارد و دمای باتری به بالاتر از ۵۵ درجه سلسیوس می‌رسد. اما با استفاده از ماده تغییر فازدهنده، حتی در حالتی که دمای هوای محیط در ۵۲ درجه سلسیوس باشد، دمای باتری از ۵۵ درجه سلسیوس بیشتر نمی‌شود.

جوانی و همکاران [۲۳] به بررسی توزیع دما و عملکرد خنک‌کاری با استفاده از مواد تغییر فازدهنده در ضخامت‌های مختلف در اطراف سلول‌های لیتیوم-یون پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ضخامت سه میلیمتر، یکنواختی بهتری در مقایسه با سایر ضخامت‌ها ایجاد می‌کند. همچنین آنها در تحقیق دیگری [۲۴] به بررسی یک سامانه خنک‌کاری غیرفعال برای خودروی الکتریکی پرداختند. آنها اکتادیکن^۱ را بین سلول‌های لیتیوم-یون قرار دادند و با شبیه‌سازی عددی، خصوصیات حرارتی سامانه را تحلیل کردند. نتایج آنها کاهش دمای ۷/۳ درجه سلسیوس با استفاده از مواد تغییر فازدهنده نسبت به حالتی که از این مواد استفاده نمی‌شود را نشان داد.

دنگ و همکاران [۲۵] به بررسی تجربی ویژگی‌های حرارتی باتری لیتیوم یونی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده (پارافین) همراه با فوم‌های فلزی و پرها پرداختند. نتایج آنها نشان داد افزودن فوم فلزی می‌تواند هدایت حرارتی را افزایش داده و دمای باتری را در مقایسه با ماده تغییر فازدهنده معمولی کاهش دهد. همچنین افزودن پرها می‌تواند دمای باتری را بیشتر کاهش دهد.

لازارک و همکاران [۲۶] تأثیر انتخاب نوع ماده تغییر فازدهنده بر خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم-یون استوانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از مدل‌سازی عددی، تأثیر دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده بر خنک‌کاری باتری و روند افزایش دمای باتری در شار حرارتی ثابت را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده با زمان رسیدن دمای باتری به حد مجاز رابطه مستقیم دارد.

کومار و همکاران [۲۷] به بررسی مدیریت حرارتی باتری و مطالعه عددی استفاده از نانومواد برای افزایش هدایت حرارتی و تأثیر آن بر افزایش انتقال حرارت پرداختند و کاهش دمای باتری‌ها در محدوده کاری بهینه را گزارش کردند.

چن و همکاران [۲۸] یک سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی با خنک‌کننده مایع و مواد تغییر فازدهنده کامپوزیت حاوی گرافیت منبسط شده پرداختند و نتایج آنها حاکی از بهبود عملکرد خنک‌کاری این سیستم بود. از سوی دیگر راجان و همکاران [۲۹] بصورت تجربی به تجزیه و تحلیل سیستم مدیریت حرارتی باتری با استفاده از

¹N-Octadecane

ماده تغییر فازدهند ۱- تترادکانول پرداختند و مشاهده نمودند که اگر از این ماده به تنهایی استفاده شود، به دلیل پائین بودن هدایت حرارتی، کارایی بالایی نخواهد داشت.

موسوی و همکاران [۳۰] نیز طرح جدیدی برای خنک کاری ترکیبی مجموعه باتری لیتیوم-یونی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده و صفحات سرد مینی کانالی معرفی نموده‌اند و نتایج آنها حاکی از بهبود عملکرد خنک کاری این سیستم بوده است. یانگ و همکاران [۳۱] نیز در یک مطالعه عددی بکارگیری نانوسیال و مواد تغییر فازدهنده را برای تقویت خنک کاری سیستم مدیریت حرارتی باتری مثبت ارزیابی کردند. همچنین کائو و همکاران [۳۲] اثر استفاده از نانوکپسول‌های حاوی مواد تغییر فازدهنده در بهبود نرخ خنک کاری باتری‌های لیتیوم-یونی را بصورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. کاهش میانگین و بیشینه دما و افزایش یکنواختی دما در مجموعه باتری، در نتیجه خنک کاری با آب حاوی مواد تغییر فازدهنده محصور شده با نانوذرات نسبت به خنک کاری با آب توسط قادری و ویسی [۳۳] گزارش شده است.

گوان و همکاران [۳۴] به بررسی روش‌های اصلاح مواد تغییر فازدهنده و کاربردهای آن‌ها در مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون پرداختند. آنها مفاهیم بنیادی و طبقه‌بندی‌های مواد تغییر فازدهنده را معرفی کرده و سپس روش‌های اصلاح و تأثیر آن‌ها بر خواص مواد را به طور مفصل بررسی کردند. همچنین کاربردهای خاص مواد تغییر فازدهنده در سیستم‌های مدیریت حرارتی را برای باتری‌های لیتیوم-یون به طور کامل مورد بحث قرار دادند.

پاچیولا و همکاران [۳۵] در مطالعه‌ای به بررسی روش‌های مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یونی برای کاهش خطرات ناشی از افزایش دما مانند فرار حرارتی پرداختند. در پژوهش آنها از سیستمی غیرفعال و کم‌هزینه با استفاده از مواد تغییر فازدهنده نظیر n-اکتادکان به دلیل خواص ترموفیزیکی مناسب و قیمت بازار آن بهره گرفته شد. آنها برای تحلیل سلول‌های تکی و مجموعه‌های کوچک باتری از چهار روش خنک کاری شامل هوا، پره‌ها، مواد تغییر فازدهنده خالص و سیستم ترکیبی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که سیستم خنک کاری با استفاده از مواد تغییر فازدهنده همراه با پره‌ها در کنترل دما مؤثرتر می‌باشند و بهترین ضخامت پره ۱/۵ میلی‌متر و تعداد پره مناسب ۱۰ عدد تعیین شد. همچنین، استفاده از صفحات $n+1$ ، که n تعداد سلول‌ها است، بهینه‌ترین عملکرد در کاهش دمای مجموعه باتری را نشان می‌دهد.

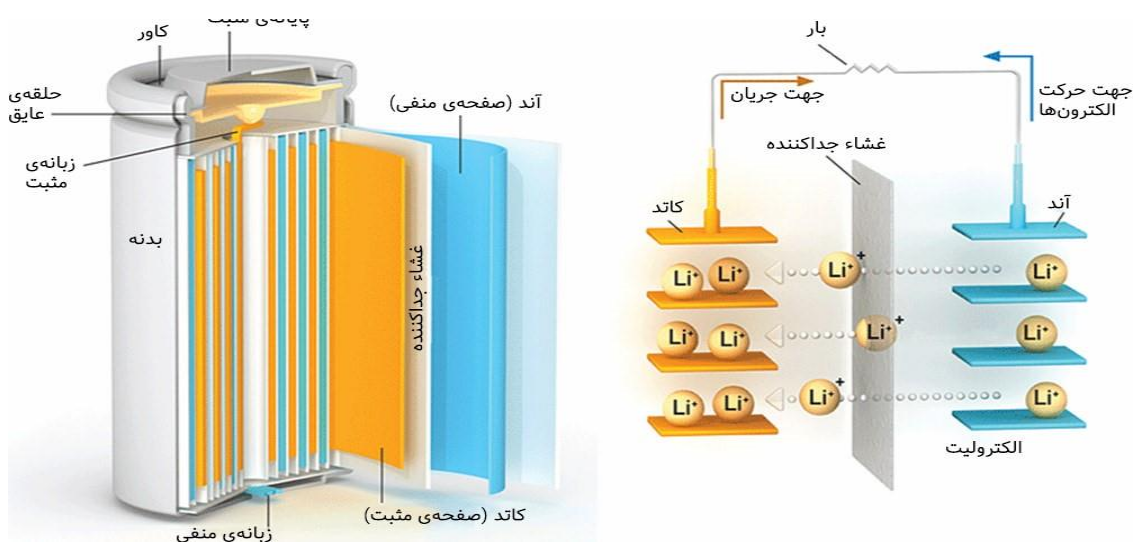
دانگ و همکاران [۳۶] سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی با استفاده از خنک کاری مایع و مواد تغییر فازدهنده ترکیبی برای بهبود عملکرد خنک کاری باتری‌های لیتیوم-یونی را مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه آنها، تأثیر عواملی مانند تعداد کانال‌های جریان، فاصله کانال‌ها از سطوح مختلف، نرخ جریان سیال، دمای ورودی خنک‌کننده و دمای تغییر فاز ماده مورد بررسی عددی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که ترکیب مواد تغییر فازدهنده با خنک کاری مایع در نرخ تخلیه $6C$ و تعداد ۵ کانال جریان باعث کاهش ۶/۴۴ درصدی دمای حداکثر و ۳۴/۳۵ درصدی تفاوت دمایی حداکثر مازول باتری می‌شود. با افزایش نرخ جریان، کاهش دما کندتر، اما افت فشار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دمای ذوب مواد تغییر فازدهنده باعث افزایش تفاوت دمایی در مازول باتری شده که این اثر در دماهای ورودی بالاتر خنک‌کننده شدیدتر است. بنابراین، تنظیم دقیق نرخ جریان و دمای ورودی خنک‌کننده برای طراحی سیستم‌های مدیریت حرارتی مؤثر ضروری است.

نظر به مرور انجام شده، در مطالعه حاضر، به بررسی سامانه مدیریت حرارتی برای خنک کاری یک مجموعه باتری و جستجوی حالت بهینه با استفاده از شبیه سازی عددی پرداخته می شود. برای دستیابی به سامانه مدیریت حرارتی بهینه، به بررسی سیستم های خنک کاری غیرفعال، فعال و ترکیبی مختلف که شامل جابجایی طبیعی هوا، جابجایی اجباری هوا (در حضور چاه حرارتی پین دار)، جابجایی اجباری هوا به همراه ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) و جابجایی اجباری هوا به همراه ماده تغییر فاز دهنده و بهبود دهنده های رسانندگی حرارتی در دو حالت فوم فلزی و فوم فلزی-فین می باشد، پرداخته شده است. عملکرد هریک از روش های خنک کاری به تنهایی و یا بصورت ترکیبی در کاهش دما مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۲- باتری لیتیوم-یون

لیتیوم سبک ترین فلز، کمترین وزن اتمی و کمترین پتانسیل را در برابر هیدروژن دارد. در دهه ۱۹۷۰، نخستین سلول های لیتیوم تولید شدند که از فلز لیتیوم برای آند، اکسید منگنز برای کاتد و نمک لیتیوم محلول در یک ترکیب آلی از پروپیلن کربنات و دیمتوکسیتان به عنوان الکترولیت استفاده می شد. سلول های لیتیوم اولیه دارای نرخ خود تخلیه شونده و ولتاژ پایینی بودند. اجزا و ساختار یک باتری لیتیوم-یون در شکل (۱) نشان داده شده است.

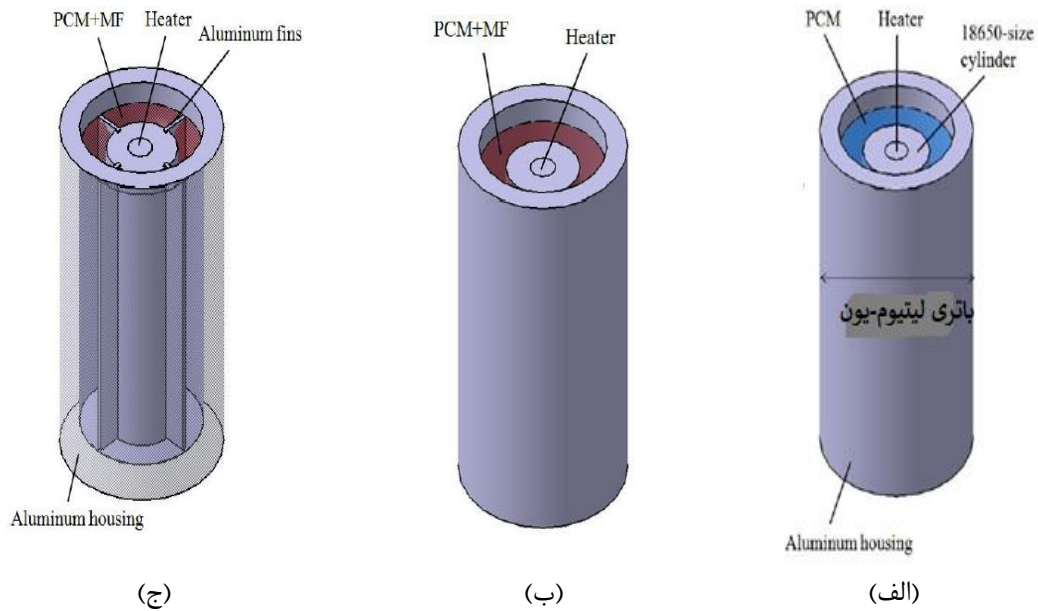
قرار گرفتن تعداد زیاد سلول ها و نرخ شارژ و دشارژ های زیاد در باتری ها باعث افزایش دمای ناشی از واکنش های الکتروشیمیایی و عبور الکترون شده و افزایش دمای بالایی در کل مجموعه باتری را در پی خواهد داشت. عدم کنترل دما، موجب کوتاه شدن طول عمر، کاهش ظرفیت و یا حتی در موارد حادتر، باعث انفجار باتری خواهد شد. از طرف دیگر مجموعه متشکل از سلول های باتری نیز می بایست در دمای تقریباً یکسانی نسبت به یکدیگر کار کنند؛ چراکه در صورت عدم رعایت این مسئله، باعث شارژ و دشارژ غیر یکنواخت سلول ها خواهد شد و در نتیجه عمر باتری را نیز کاهش می دهد [۳۷]. استفاده از یک سامانه مدیریت حرارتی مناسب جهت خنثی کردن و از بین بردن این مشکلات در مجموعه باتری، بسیار حائز اهمیت بوده و می بایست هم دمای میانگین و هم دمای هر سلول در محدوده مشخص کنترل شود.



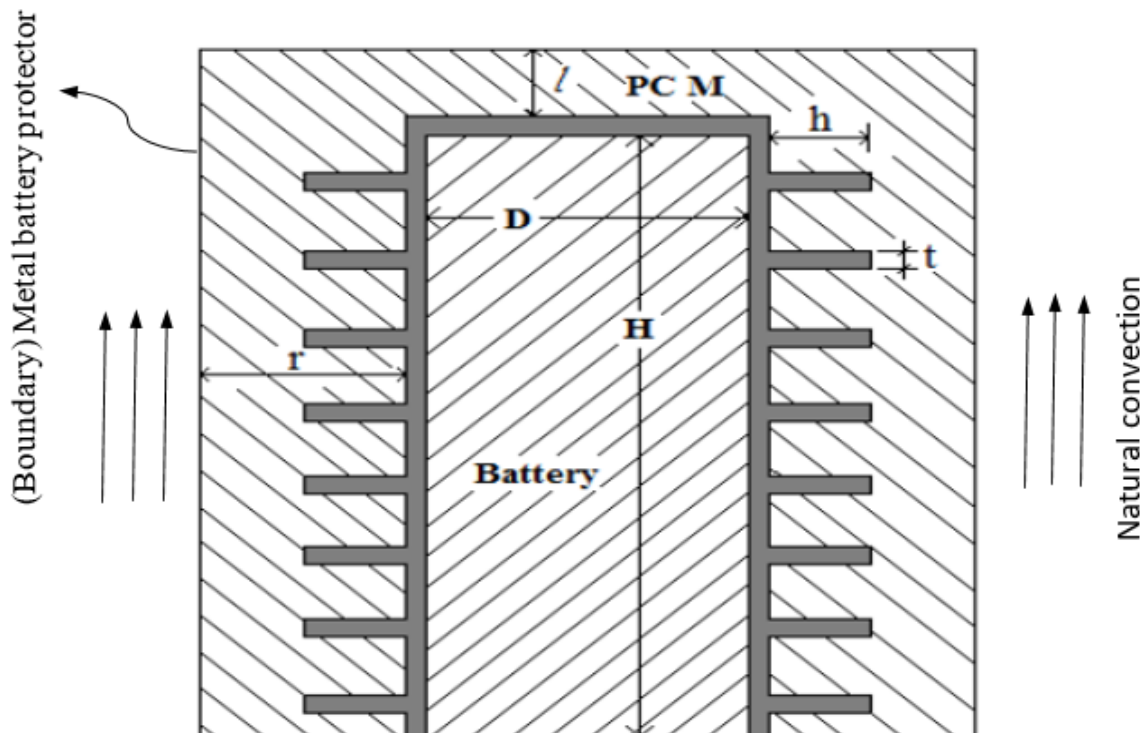
شکل ۱- اجزا و ساختار یک باتری لیتیوم-یون

۳- هندسه حل و معادلات حاکم

برای مطالعه و بررسی نحوه خنک کاری باتری، سه حالت مواد تغییر فازدهنده برای احاطه باتری در محفظه فلزی مطابق مرجع [۲۳] در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- هندسه مواد تغییر فازدهنده برای مدیریت حرارتی باتری؛ (الف) مواد تغییر فازدهنده (ب) مواد تغییر فازدهنده و فوم فلزی (ج) مواد تغییر فازدهنده، فوم فلزی و پره [۲۳]



شکل ۳- پارامترهای هندسی به همراه شرایط مرزی برای باتری مورد مطالعه [۳۸]

جدول ۱- ابعاد هندسه مطالعه شده [۳۸]

پارامتر	r	l	t	j	D	H
ابعاد (mm)	۱۲	۶	۰/۵	۶	۲۰	۴۴

شکل (۲) هندسه مواد تغییر فازدهنده برای مدیریت حرارتی باتری را برای سه حالت مختلف نشان داده است. در شکل (۲-الف) موم پارافین خالص تقریباً ۲۵ گرم در فضای بین باتری و محفظه قرار داده شده است. در شکل (۲-ب) پارافین به همان جرم ۲۵ گرمی داخل فوم فلزی پر شده است و در شکل (۲-ج) ابتدا چهار پره آلومینیومی بر روی شیارهای پیش ساخته روی سطح باتری نصب شده و سپس با مواد تغییر فاز دهنده و فوم فلزی پر شده است. شکل (۳) پارامترهای هندسی باتری مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد. در این شکل، H ارتفاع باتری، D قطر باتری، h ارتفاع پره، t ضخامت پره، n تعداد پره، r ضخامت ماده تغییر فاز دهنده در وجه جانبی و l ضخامت ماده تغییر فاز دهنده در وجه فوقانی باتری است. مقادیر پارامترهای فوق در جدول (۱) ارائه شده است.

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی می‌باشند که با فرض چگالی و خواص ترموفیزیکی ثابت بیان می‌شوند. معادلات بقای جرم و مومنتوم به ترتیب عبارتند از [۳۱]:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\nabla \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \mu \nabla \cdot (\nabla \vec{v}) + \rho \vec{g} + S \vec{v} \quad (2)$$

برای نشان دادن اثر تغییر فاز بر جابجایی تابع تخلخل S که توسط برنت و همکاران تعریف شده است به معادلات تکانه اضافه می‌شوند و معادله تابع تخلخل در زیر بیان می‌شود [۳۹]:

$$S = -C \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \quad (3)$$

که در آن، C ثابت ناحیه خمیری بخشی از معادله کارمن-کوزنی که برای وارد کردن یک ترم میرایی در معادله مومنتوم برای مدل‌سازی جریان سیال در یک محیط متخلخل استفاده می‌شود که در محدوده $(10^{-5} - 10^{-8})$ قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، این ثابت 10^{-5} انتخاب شده است. ε عدد خیلی کوچک است و برای اجتناب از تقسیم بر صفر وارد شده است. γ نیز کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده است. معادله انرژی توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{v} H) = k \nabla \cdot (\nabla T) \quad (4)$$

انتقال حرارت در داخل ماده تغییر فاز دهنده توسط معادلات زیر بیان می‌شود.

$$\rho_{PCM} \frac{\partial H_{PCM}}{\partial t} = k_{PCM} \nabla \cdot (\nabla T_{PCM}) \quad (5)$$

$$H = h_s + \Delta H \quad (6)$$

$$H_{PCM} = \int_{T_0}^{T_{PCM}} C_{PCM} dT + \gamma h_{sf} \quad (7)$$

$$\Delta H = \gamma h_{sf} \quad (8)$$

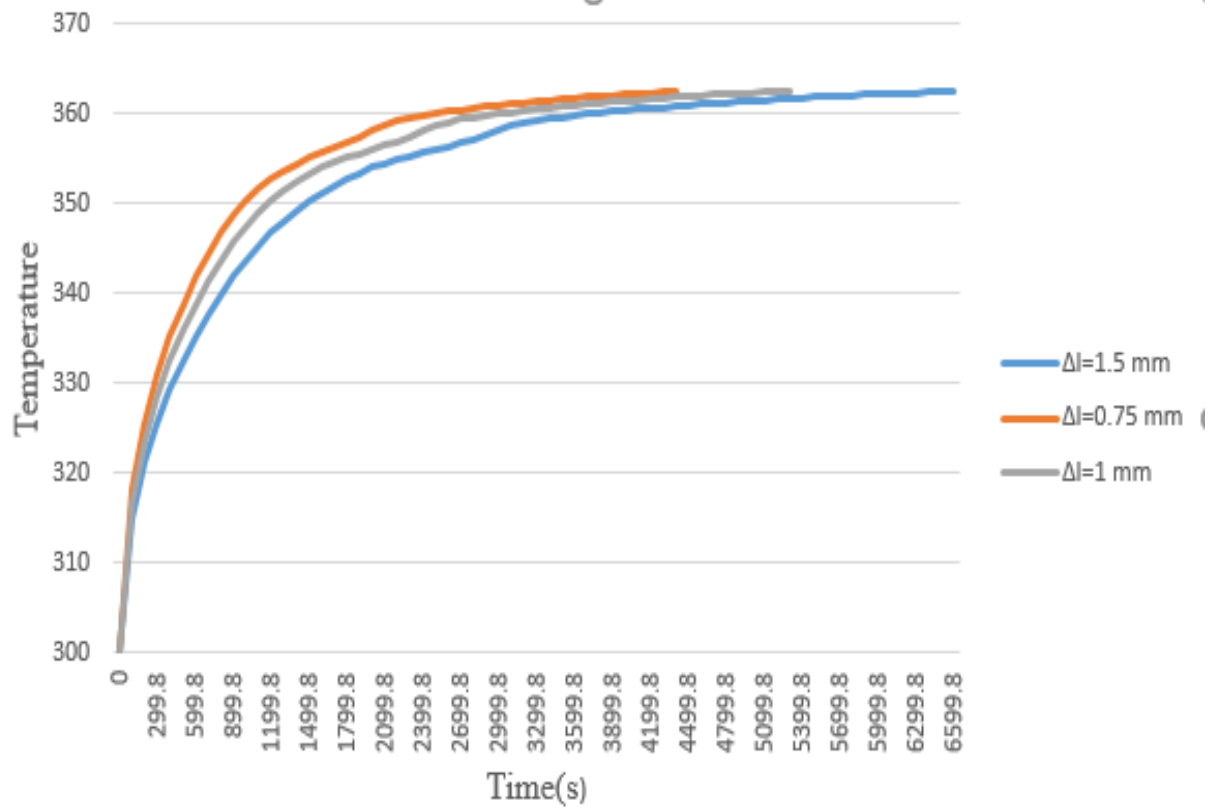
که در آن، T_{PCM} و T_0 به ترتیب نشان دهنده دمای ماده تغییر فاز دهنده و دمای محیط اطراف می‌باشند. h_{sf} نیز معرف گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده است.

۴- شبیه‌سازی عددی

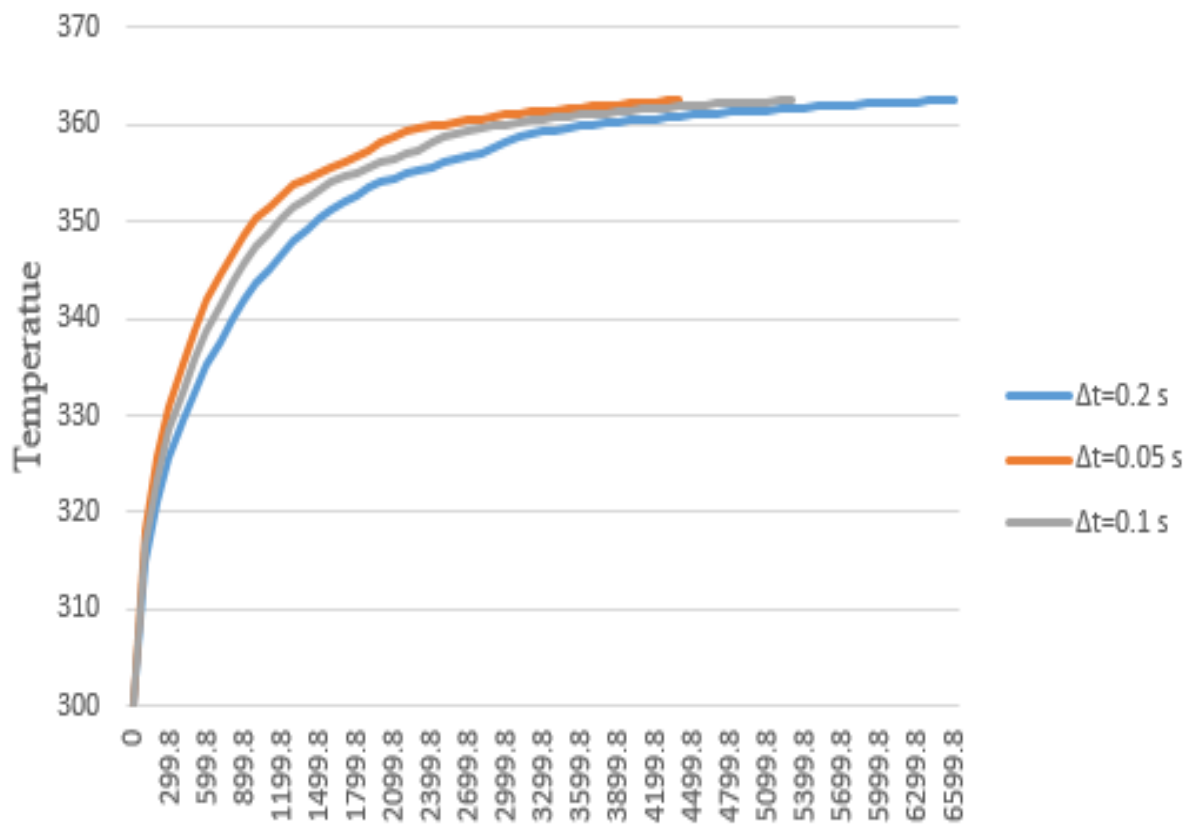
به منظور حل معادلات بیان شده در هندسه مسئله از نرم افزار انسیس فلوئنت ورژن ۲۰۲۳R1 استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادله مومنتوم و انرژی از روش آپویند مرتبه دوم به منظور اطمینان از دقت حل و همچنین روش سیمپل برای کوپل میدان سرعت و فشار استفاده شده است. در مطالعه حاضر با استفاده از شرط مرزی تقارن، تنها یک کانال مدلسازی شده است و حجم کنترل مشخص شده در واقع قسمتی از یک میدان جریان تکرارشونده است. برای شبکه‌بندی هندسه مورد نظر از شبکه هگزاهدراال شش وجهی و چهار وجهی در قالب شبکه‌های منشوری شکل استفاده شده است که شبکه‌ها کاملاً به صورت منظم و سازمان یافته قرار گرفته‌اند. در ادامه به استقلال حل از شبکه و صحت سنجی حل پرداخته می‌شود.

۴-۱- استقلال حل از شبکه

در ابتدای شبیه‌سازی، مبحث استقلال نتایج از شبکه برای دقیق بودن نتایج خروجی بررسی شده است [۳۸] که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. از طرفی در مسئله بیان شده، حل پایا نبوده و وابسته به زمان می‌باشد. لذا زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده بسیار مهم می‌باشد و فاصله زمانی بهینه در حل عددی اهمیت دارد. بنابراین استقلال حل از اندازه گام زمانی نیز بررسی شده است و در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. شبکه حل بهینه با اندازه شبکه ۱/۰ میلی‌متر (با تعداد ۲۸۷۴۵۶ المان) و گام زمانی ۰/۱ ثانیه انتخاب شده است. در شکل (۵) نیز هندسه شبکه‌بندی شده از نماه ن داده شده است.

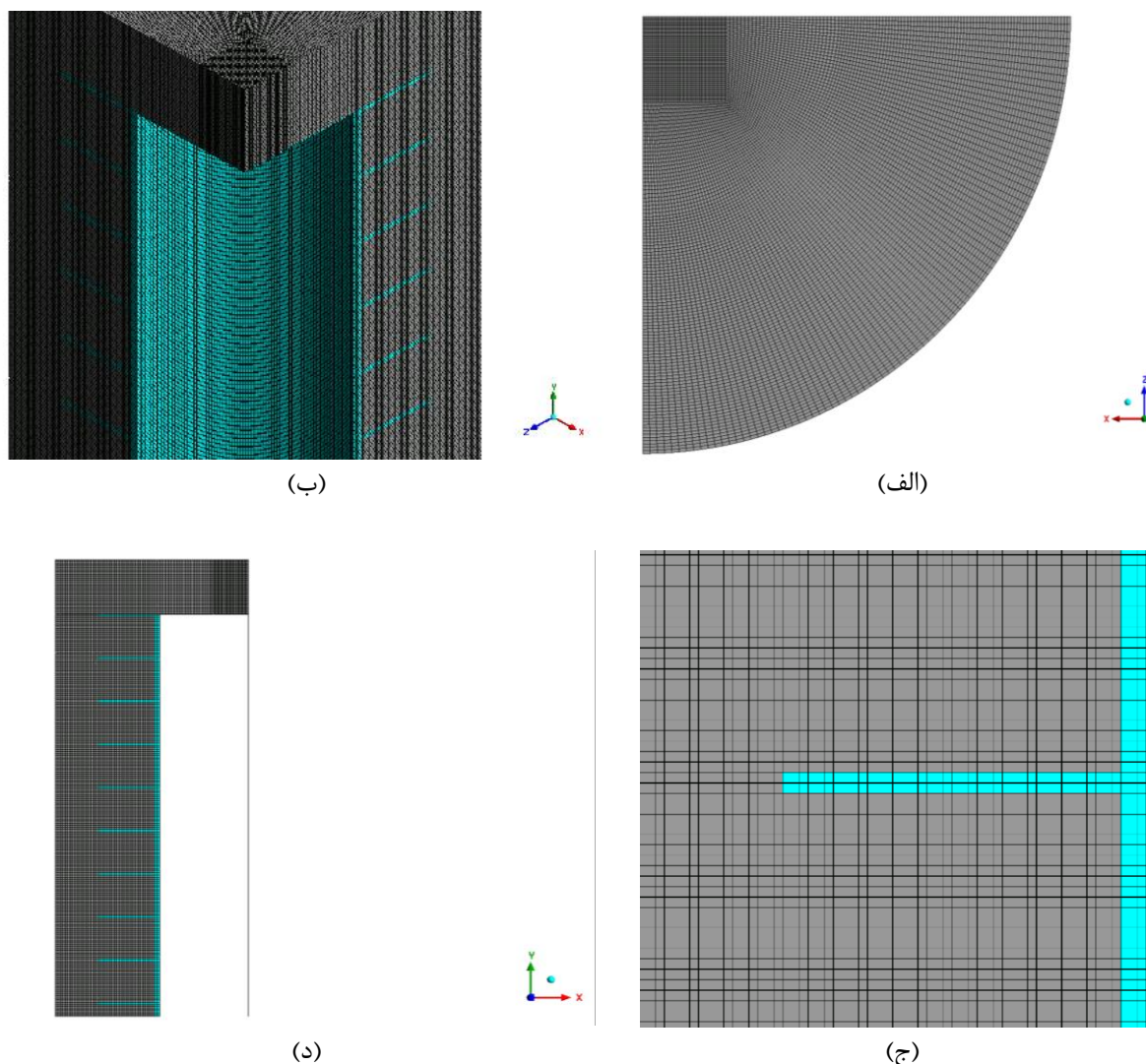


(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) استقلال حل از شبکه (ب) استقلال حل از گام زمانی



شکل ۵- شبکه بندی انجام شده در انسیس فلونت؛ (الف) نمای شبکه از بالای باتری، (ب) نمای شبکه جانبی اطراف یک پره، (ج) نمای بزرگنمایی شده شبکه اطراف یک پره، (د) نمای جانبی شبکه اطراف پرها

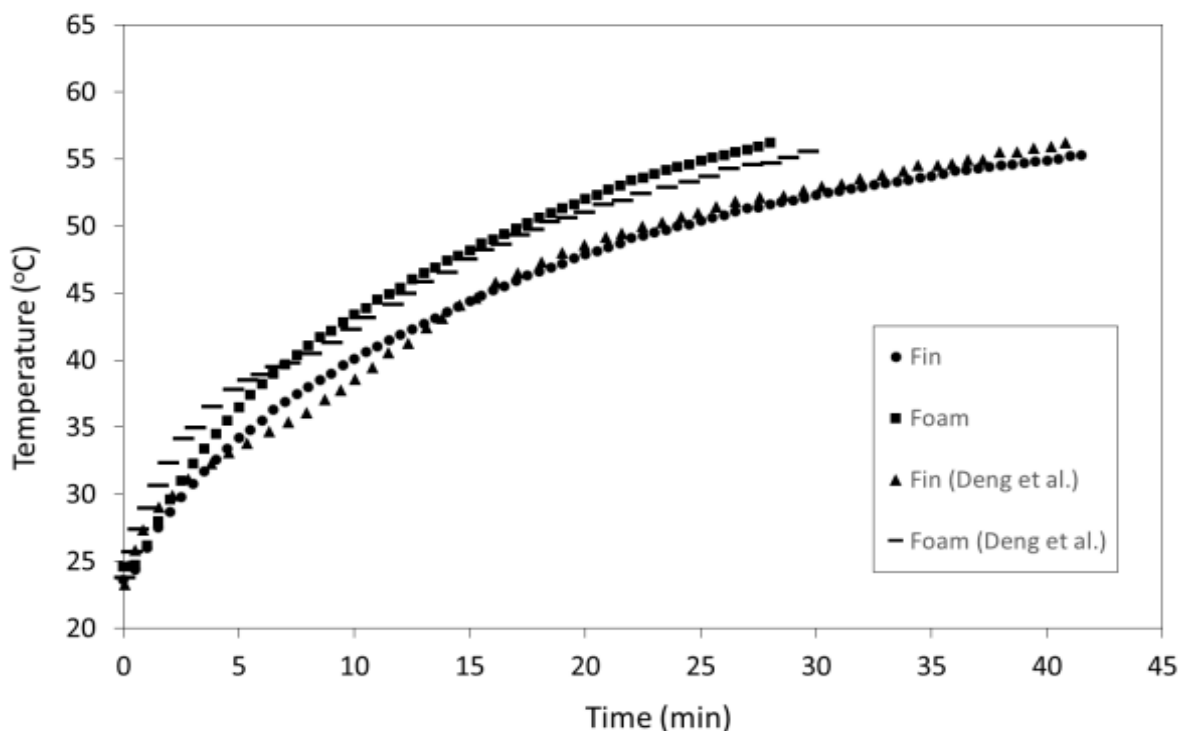
۴-۲- صحت سنجی حل

برای اطمینان از صحت روش شبیه سازی و نتایج حاصله، اعتبار نتایج عددی با استفاده از نتایج موجود در زمینه خنک کاری باتری لیتوم-یون با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده است. به منظور مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی موجود، از تحقیق دنگ و همکاران [۲۳] استفاده شده است. در کار دنگ و همکاران از هیتر به منظور شبیه سازی تولید حرارت باتری لیتوم-یون استفاده شده و از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است و تأثیر وجود فوم مسی و پره در کنار پارافین بررسی شده است.

در شکل (۶) به مقایسه تأثیر عملکرد سیستم برای مطالعه حاضر و مطالعه دنگ و همکاران [۲۳] زمانی که تنها از فوم مسی استفاده شده و زمانی که همزمان از فوم و پره استفاده شده است، پرداخته شده است. همانطور

که از شکل مشاهده می‌شود، نتایج از تطابق خوبی برخوردار است. قابل ذکر است که استفاده از پره به میزان قابل توجهی خنک کاری سیستم را بهبود بخشیده است.

جدول (۲) اختلاف بین نتایج مطالعه حاضر و مطالعه دنگ و همکاران برای حالت استفاده از پره در محدوده زمانی ۵ تا ۱۵ ثانیه که اختلاف نتایج بیشتر است را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر خطا ۵/۵۱ درصد می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه تأثیر استفاده از پره در تحقیق حاضر و کار دنگ و همکاران [۲۳]

جدول ۲- مقایسه نتایج کار حاضر و دنگ و همکاران [۲۳] برای توزیع دما در حالت استفاده از پره مطابق شکل (۶)

درصد اختلاف	مطالعه حاضر	مطالعه دنگ و همکاران	زمان (ثانیه)
۱/۲۱	۳۳/۱۰	۳۳/۵۰	۴/۵۳
۲/۷۸	۳۳/۷۶	۳۴/۷۰	۵/۴۱
۳/۸۱	۳۴/۶۹	۳۶/۰۱	۶/۲۸
۴/۸۷	۳۵/۳۵	۳۷/۰۷	۷/۱۵
۵/۱۲	۳۶/۱۵	۳۸	۷/۹۴
۴/۶۶	۳۶/۹۴	۳۸/۶۶	۸/۷۲
۴/۳۹	۳۷/۷۴	۳۹/۴۰	۹/۴۲
۴/۱۲	۳۸/۵۳	۴۰/۱۲	۱۰/۰۳
۳/۶۷	۳۹/۴۶	۴۰/۹۱	۱۰/۸۱
۲/۳۰	۴۰/۵۱	۴۱/۴۴	۱۱/۵۱
۲/۰۸	۴۱/۱۸	۴۲/۰۴	۱۲/۳۸

۰/۹۲	۴۲/۳۷	۴۲/۷۶	۱۳/۰۸
۰/۶۰	۴۳/۰۳	۴۳/۲۹	۱۳/۷۸

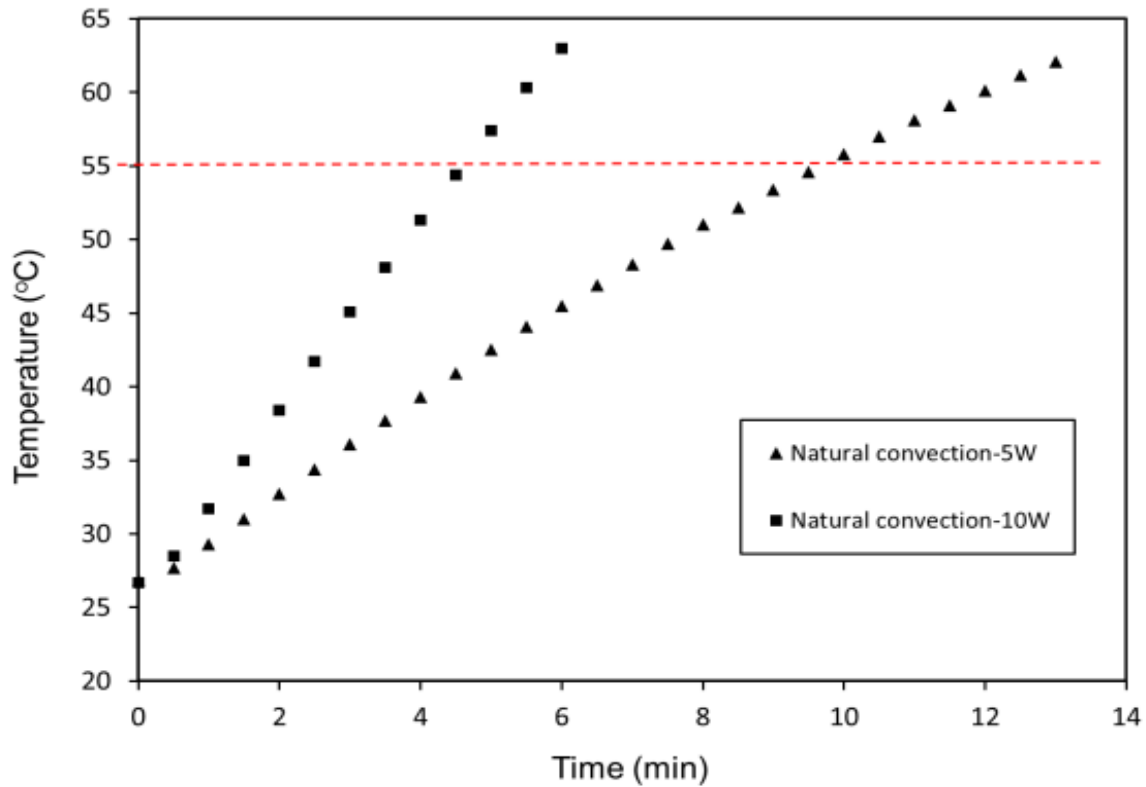
۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از مدلسازی حرارتی باتری، خنک‌کاری و پایش دمایی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا سیستم‌های خنک‌کاری جابجایی آزاد هوا، جابجایی اجباری هوا در حضور چاه حرارتی، جابجایی اجباری هوا به همراه ماده تغییر فاز دهنده-پارافین، جابجایی اجباری هوا به همراه پارافین و فوم فلزی و جابجایی اجباری هوا به همراه پارافین، فوم و پره بررسی می‌شود. همچنین در ادامه به بررسی تغییرات کسر جرمی مختلف مواد تغییر فاز دهنده در فرآیند ذوب بر عملکرد سیستم خنک‌کاری پرداخته شده است.

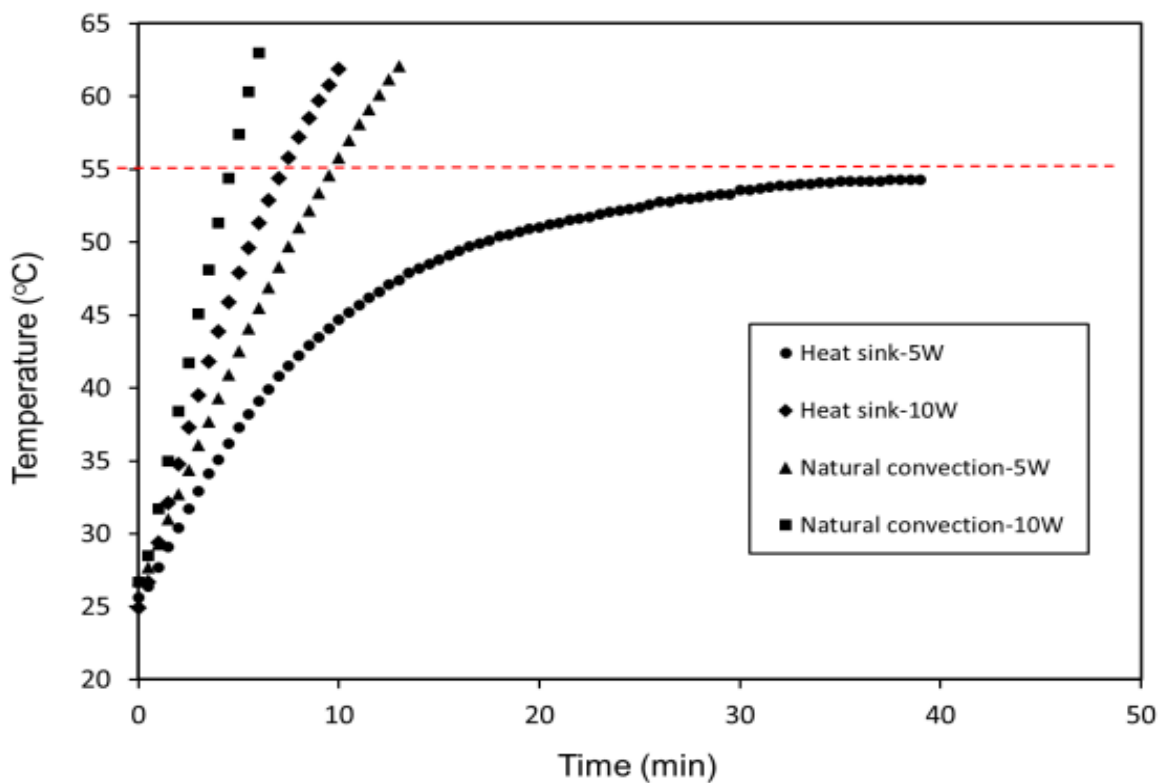
۵-۱- تأثیر جابجایی آزاد و اجباری در توان‌ها و دبی‌های مختلف بر سیستم خنک‌کاری

در این بخش به بررسی عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور شرایط توان ۵ وات، دمای هوای ۲۴ درجه سلسیوس و دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه (به جز خنک‌کاری با جابجایی طبیعی هوا) به عنوان حالت پایه و مبنای برای هر سیستم در نظر گرفته شده است.

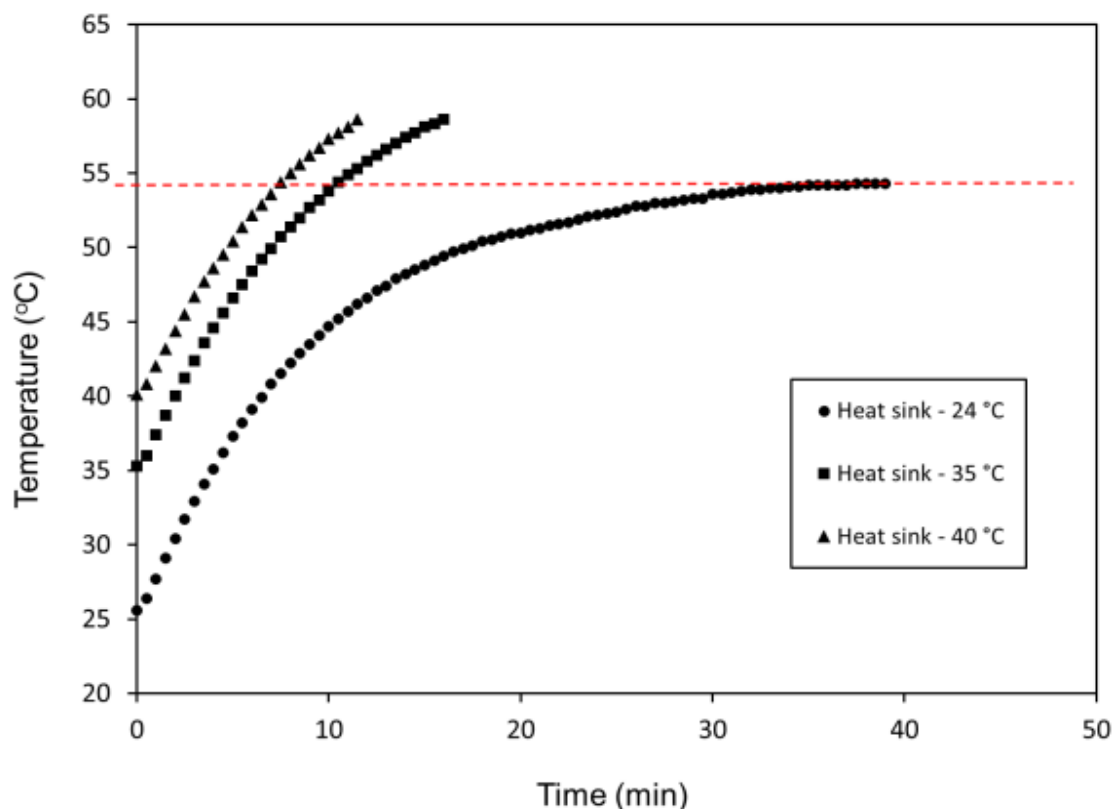
در شکل (۷) تغییرات دمای باتری برحسب زمان در وضعیت خنک‌کاری با جابجایی طبیعی هوا در دو حالت توان حرارتی ۵ و ۱۰ وات در دمای ۲۴ درجه سلسیوس نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در توان ۵ وات دما پس از زمان تقریبی ۱۰ دقیقه از حد مجاز ۵۵ درجه سلسیوس عبور کرده و هنگامی که نرخ تولید حرارت به دو برابر (۱۰ وات) افزایش پیدا می‌کند این زمان به نصف مقدار قبلی (۵ دقیقه) کاهش یافته است. از آنجا که روند افزایشی دما هر دو حالت تقریباً خطی است، مشاهده می‌شود که دما پس از گذر از دمای مجاز سیستم در مدت اندکی از دمای بحرانی نیز عبور می‌نماید.



شکل ۷- تغییرات دمای باتری برحسب زمان در خنک کاری با جابجایی طبیعی هوا در توان حرارتی ۵ و ۱۰ وات باتری



شکل ۸- مقایسه تغییرات دمای باتری برحسب زمان در خنک کاری با جابجایی طبیعی هوا و خنک کاری اجباری جریان هوای ۵۰ لیتر بر دقیقه در توان حرارتی ۵ و ۱۰ وات و دمای اولیه ۲۴ درجه سلسیوس



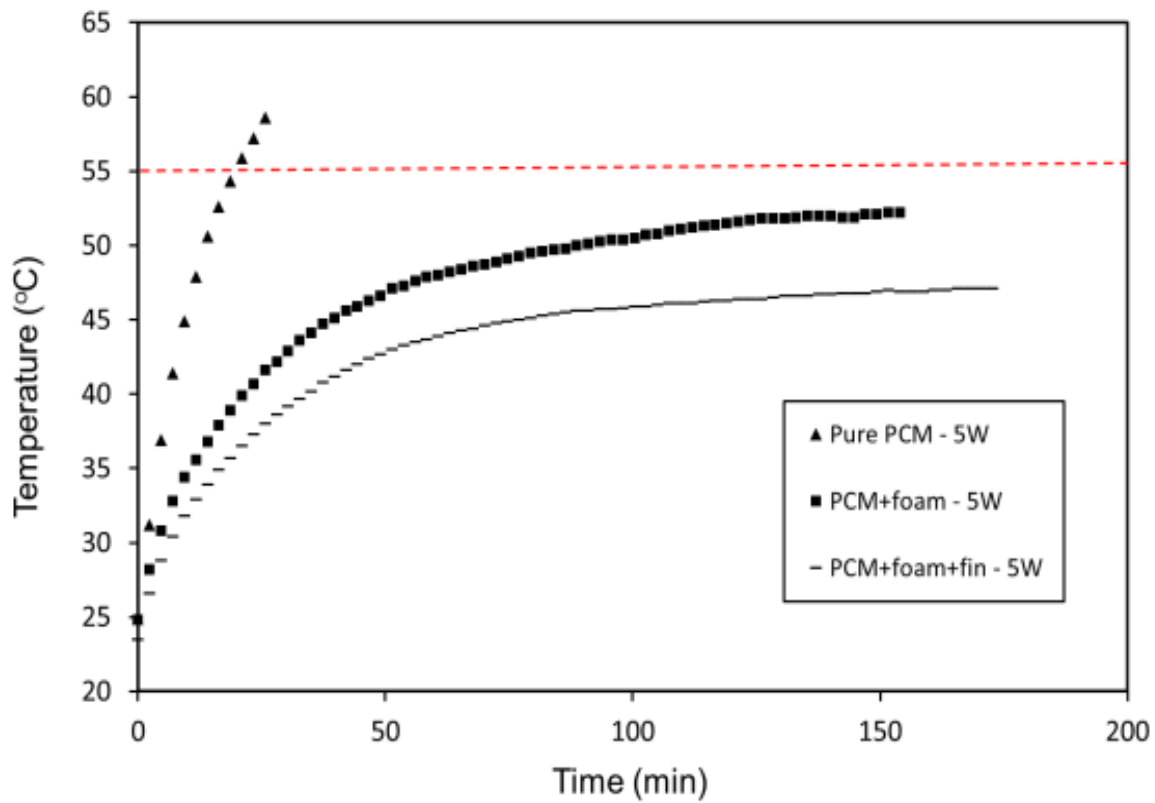
شکل ۹- تغییرات دمای باتری برحسب زمان در خنک کاری اجباری جریان هوای ۵۰ لیتر بر دقیقه در توان حرارتی ۵ وات در دماهای مختلف خنک کاری

شکل (۸) تغییرات دمای باتری نسبت به زمان را در شرایط دمای ۲۴ درجه سلسیوس و توان‌های حرارتی ۵ و ۱۰ وات برای دو سیستم خنک کاری با جابجایی آزاد هوا و جابجایی اجباری با استفاده از چاه حرارتی در دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از خنک کاری اجباری در توان پایین می‌تواند دما را در مرز دمای مجاز نگه دارد؛ اما در اثر افزایش نرخ تولید گرما، عملکرد این سیستم به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد به طوری که در مدت زمان ۷/۵ دقیقه و ۹ دقیقه به ترتیب از دمای مجاز و دمای بحرانی عبور می‌کند.

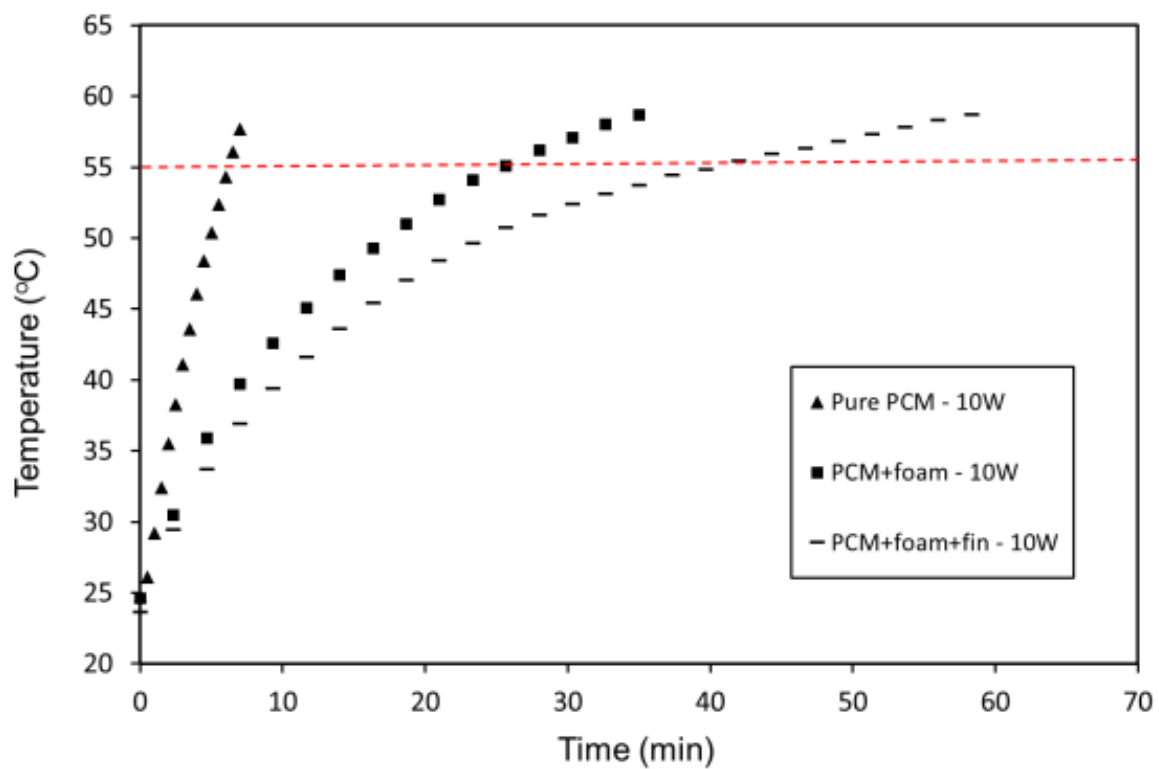
تأثیر دمای محیط بر عملکرد سیستم خنک کاری اجباری با استفاده از چاه حرارتی در دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه و توان حرارتی ۵ وات در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شیب و روند افزایش دما در تمام حالات تقریباً یکسان بوده که نشان دهنده تأثیر مستقیم دمای هوای خنک کاری بر عملکرد سیستم است که با افزایش دمای ورودی در زمان کوتاه‌تری از دمای مجاز ۵۵ درجه سلسیوس عبور می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت در صورت افزایش دمای محیط، نمی‌توان به یک سیستم خنک کاری تماماً فعال اکتفا نمود.

۵-۲- تأثیر پارافین، فوم فلزی و پره بر سیستم خنک کاری

تغییرات دمای باتری بر حسب زمان برای وضعیت خنک کاری با مواد تغییر فاز دهنده با فوم فلزی و پره در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰-الف) نشان دهنده مقایسه تغییرات دمای باتری در خنک کاری اجباری جریان هوای ۵۰ لیتر بر دقیقه در توان حرارتی ۵ وات در دمای اولیه ۲۴ درجه سلسیوس برای حالت پارافین خالص، ترکیب پارافین و فوم فلزی و ترکیب پارافین، فوم فلزی و پره می‌باشد.



(الف)



(ب)

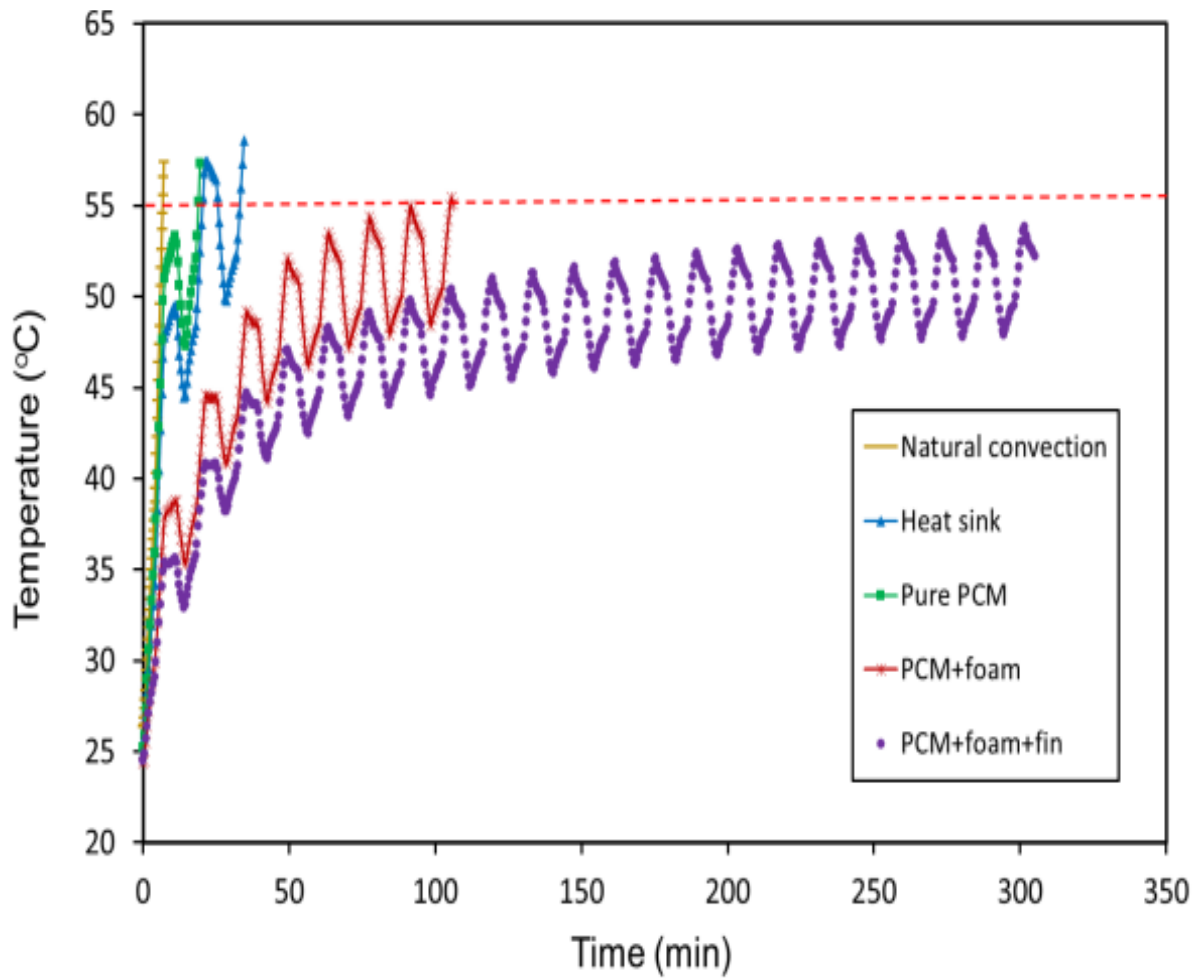
شکل ۱۰- تغییرات دمای باتری برحسب زمان در خنک کاری با مواد تغییر فاز دهنده و فوم فلزی و پره: (الف) توان حرارتی ۵ وات و (ب) توان حرارتی ۱۰ وات

همچنین شکل (۱۰-ب) نشان دهنده مقایسه تغییرات دمای باتری در خنک کاری اجباری جریان هوای ۵۰ لیتر بر دقیقه در توان حرارتی ۱۰ وات در دمای اولیه ۲۴ درجه سلسیوس برای حالت پارافین تنها، ترکیب پارافین و فوم فلزی و ترکیب پارافین، فوم فلزی و پره می باشد. همانطور که مشاهده می شود آهنگ افزایش دما در حالت فوم پره دار از همان ابتدای مدلسازی نسبت به حالت بدون پره کمتر بوده و این روند تا پایان مدلسازی نیز پابرجاست که این نکته بیانگر یکی از مزایای استفاده از پره در سیستم خنک کاری می باشد.

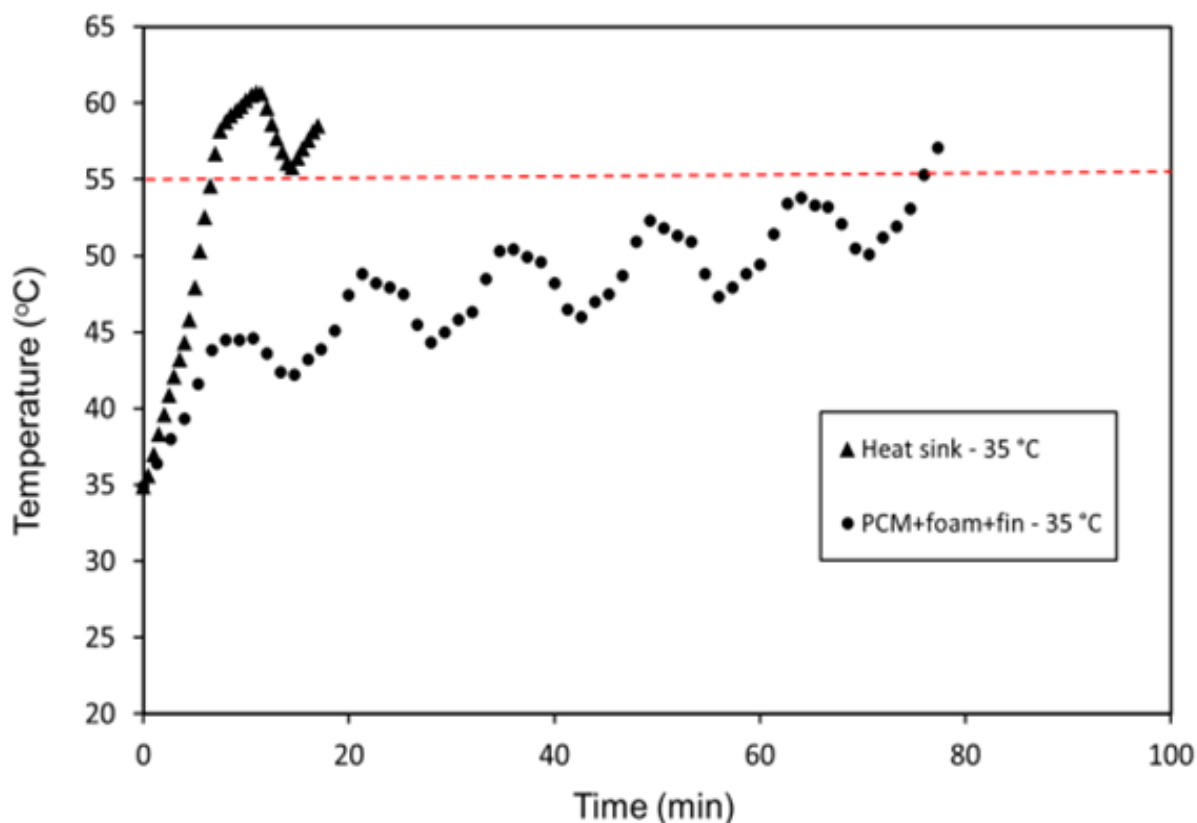
علت این رفتار این است که پره یک مسیر رسانش حرارتی با رسانایی بالا را فراهم می کند تا حرارت به طور مستقیم از سطح باتری به چاه حرارتی انتقال داده شود. همچنین چیدمان پره در داخل پارافین پیشروی جبهه ذوب پارافین را که در حالت فوم فلزی تک جهته و در راستای انتشار گرما از باتری به سمت چاه حرارتی می باشد را به دو جهت راستای انتشار گرما و عمود بر سطح پره افزایش می دهد که ورود سریعتر بخش هایی از پارافین را به ناحیه ذوب ممکن می سازد. در زمانی که دمای باتری در وضعیت خنک کاری با پارافین خالص از دمای مجاز ۵۵ درجه سلسیوس عبور می کند، برای پارافین با فوم فلزی و پارافین با فوم فلزی و پره، دما به ترتیب برابر ۳۹/۳ و ۳۶/۱ درجه است. بنابراین فوم و فوم پره دار در زمان مشابه به ترتیب دما را ۲۹٪ و ۳۴٪ نسبت به پارافین خالص کاهش می دهند.

شکل (۱۱) تغییرات دمای باتری با دمای هوای ورودی ۲۴ درجه سلسیوس را برای تمامی حالات نشان می دهد. تغییرات توان گرمکن کاملاً بر روی دما قابل مشاهده است به گونه ای که نمودار دما نیز از چرخه های تکرار شونده شامل دو افزایش دمای متوالی متناظر با توان ۵ و ۱۰ وات و سپس دو کاهش دمای متوالی متناظر با توان ۵ و ۱۰ وات تشکیل شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که خنک کاری با جابجایی آزاد هوا بدون طی حتی یک چرخه کامل، پس از حدود ۷ دقیقه از دمای مجاز عبور می نماید. حالت پارافین خالص و توان های متفاوت چاه حرارتی یک چرخه را طی کرده و به ترتیب در زمان های ۱۹ و ۲۱ دقیقه از دمای ۵۵ درجه سلسیوس عبور می کنند. در نتیجه در توان ثابت، چاه حرارتی عملکرد بسیار مناسب تری دارد، اما در حالت توان متغیر عملکرد چاه حرارتی و پارافین خالص یکسان می باشد. این پدیده نیز به دلیل ویژگی بارز مواد تغییر فازدهنده در جذب مناسب انرژی است. افزودن فوم فلزی و فوم فلزی با پره سبب می شود به جای انباشت محلی این انرژی در نزدیکی سطح باتری، از پتانسیل بخش بیشتری از ماده تغییر فازدهنده جهت ذخیره سازی استفاده شود به طوری که در حالت استفاده از فوم تنها، این سیستم می تواند به مدت ۱۰۵ دقیقه دمای باتری را در محدوده مجاز نگه داشته و در صورت به کارگیری همزمان فوم و پره، تقریباً پس از طی ۲۱ چرخه کامل به یک روند تناسبی مجاز دست می یابد که در بدترین شرایط دما به ۵۳/۸ درجه سلسیوس می رسد. بنابراین خنک کاری با جابجایی آزاد هوا، جابجایی اجباری-چاه حرارتی و جابجایی اجباری - پارافین خالص در همان چرخه اولیه از دمای مجاز ۵۵ درجه سلسیوس عبور کرده و تنها سیستم خنک کاری پارافین-فوم فلزی-پره می تواند به یک وضعیت پایدار مجاز دست یابد.



شکل ۱۱- تغییرات دمای باتری برحسب زمان در خنک‌کاری با مواد تغییر فاز دهنده و فوم فلزی و پره

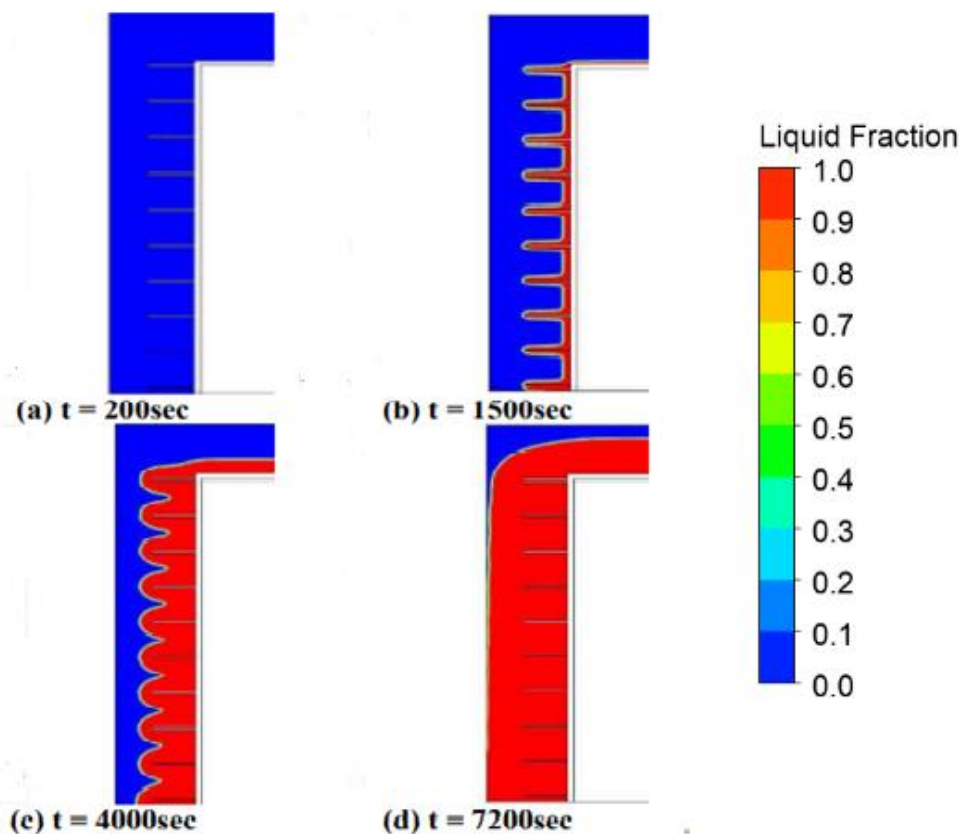


شکل ۱۲- مقایسه تغییرات دمای باتری بر حسب زمان در سیستم خنک کاری جریان اجباری هوا با دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه برای چاه حرارتی و ترکیب پارافین، فوم فلزی و فین در دمای ۳۵ درجه سلسیوس

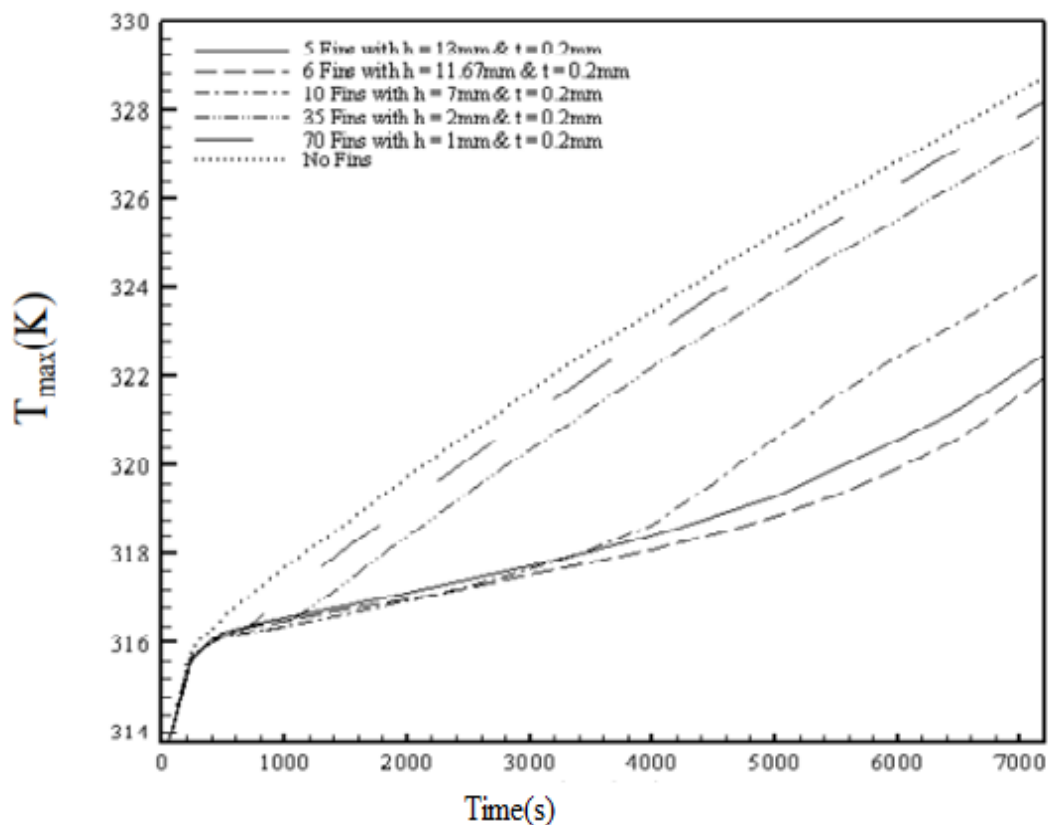
در شکل (۱۲) روند تغییرات دمای باتری در هنگام استفاده از چاه حرارتی و پارافین- فوم فلزی- پره و دمای هوای ورودی ۳۵ درجه سلسیوس نشان شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، چاه حرارتی در همان چرخه نخست ۶/۵ دقیقه پس از شروع آزمایش، گذر از دمای مجاز رخ می‌دهد در حالی که ترکیب پارافین- فوم فلزی- پره ۵ چرخه کامل را طی نموده در مدت ۷۶ دقیقه توانسته دمای باتری را کمتر از دمای مجاز نگه دارد. بدین ترتیب در دمای نسبتاً بالا نیز استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه تقویت کننده‌های رسانندگی گرمایی نقش مؤثری در بهبود انتقال حرارت داشته و باعث می‌شود تا سیستم خنک کاری هیبریدی نسبت به سیستم خنک کاری جابجایی اجباری- چاه حرارتی کارآمدتر باشد؛ به گونه‌ای که گستره زمانی مجاز بیشتر از ۱۱ برابر افزایش می‌یابد.

۵-۳- تأثیرات تغییر کسر جرمی بر سیستم خنک کاری

کسر جرمی مایع، پارامتری است که نشان دهنده نسبت جرم ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده به جرم کل ماده تغییر فاز دهنده موجود در محفظه است. بر مبنای این تعریف، در ابتدای فرایند انتقال حرارت که تمامی ماده تغییر فاز دهنده موجود در اطراف باتری که فاز جامد است، کسر جرمی مایع برابر صفر و در انتهای فرایند که کل ماده تغییر فاز دهنده موجود اطراف باتری ذوب می‌شود، مقدار آن برابر یک می‌باشد. کانتور کسر جرمی مایع برای باتری با ۱۰ پره در زمان‌های مختلف در شکل (۱۳) و تغییرات دمای بیشینه باتری بر حسب زمان در بازه زمانی دو ساعت در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- روند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در بازه دو ساعت برای باتری با ۱۰ پره



شکل ۱۴- روند تغییرات دمای ماکزیمم برای تعداد متفاوت پره‌های فولادی مختلف با ارتفاع ثابت برحسب زمان

همان گونه که مشاهده می شود تا قبل از ۲۰۰ ثانیه ماده تغییر فاز دهنده موجود به صورت جامد است که در این بازه زمانی به دلیل کم بودن ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، دمای باتری با شیب زیادی افزایش می یابد؛ تغییرات دمای بیشینه ارائه شده در شکل (۱۴) این رفتار را تایید می کند. پس از شروع ذوب ماده تغییر فاز دهنده، افزایش دمای باتری دو مرحله را طی می کند. مرحله نخست مربوط به حالتی است که ماده تغییر فازدهنده موجود بین پره در حال ذوب شدن است که این مرحله برای باتری با ۱۰ پره تا زمان ۴۰۰۰ ثانیه ادامه دارد و مرحله دوم پس از ذوب کامل ماده تغییر فازدهنده، فضای بین پره ها اتفاق می افتد که در این بخش بقیه مواد تغییر فازدهنده موجود اطراف باتری ذوب می شود. همچنین مشاهده می شود روند افزایش دمای باتری در حالتی که ماده تغییر فازدهنده موجود در فضای بین پره ها به صورت کامل ذوب نشده، کمتر از حالتی است که ذوب کامل اتفاق افتاده است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، عملکرد حرارتی سامانه خنک کاری یک مجموعه باتری با روش های مختلف با کمک شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج عددی به دست آمده، می توان به موارد ذیل به عنوان نتایج مهم اشاره کرد:

- خنک کاری با جابجایی اجباری هوا در با مقایسه با جابجایی آزاد هوا دمای باتری را بیشتر کاهش می دهد.
- در خنک کاری با جابجایی اجباری با افزایش توان حرارتی باتری، عملکرد آن تا حدودی به سیستم جابجایی آزاد نزدیک می گردد.
- در خنک کاری با جابجایی اجباری با افزایش دمای محیط، دما در زمان کمتری از ناحیه مجاز عبور می کند.
- استفاده از ماده ی تغییر فازدهنده (پارافین) در مقایسه با جابجایی اجباری در یک توان ثابت، عملکرد ضعیف تری دارد که علت این امر به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی پارافین است.
- بهره گیری همزمان از ماده تغییر فازدهنده و رساناهای حرارتی نظیر فوم فلزی و پره به جهت برطرف نمودن مشکل رسانش پایین پارافین با ایجاد یک شبکه ی پیوسته رسانای حرارتی، به میزان قابل توجهی خنک کاری را ارتقا می دهند.
- کاهش دمای باتری در ترکیب پارافین-فوم-پره به مراتب بیشتر از حالت بدون پره است؛ چرا که فوم فلزی در پخش و توزیع گرما و پره در انتقال آن نقش اساسی تری دارند.
- در توان حرارتی متغیر، ترکیب پارافین-فوم-پره موجب می شود دما از حد مجاز بالاتر نرود و یک وضعیت پایدار مجاز به دست آید.
- روند افزایش دمای باتری در حالتی که ماده تغییر فازدهنده موجود در فضای بین پره ها به صورت کامل ذوب نشده، کمتر از حالتی است که ذوب کامل اتفاق افتاده است.

مراجع

[1] R. Sabbah, R. Kizilel, J. Selman, and S. Al-Hallaj, "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*, Vol. 182, pp. 630-638, 2008/08/01 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>.

[2] M. Al-Zareer, I. Dincer, and M. A. Rosen, "A Review of Novel Thermal Management Systems for Batteries," *International Journal of Energy Research*, Vol. 42, pp. 3182-3205, 2018/08/01 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/er.4095>.

[3] M. R. Babaei, G. A. Sheikhzadeh, and A. A. Abbasian Arani, "Numerical Study of Thethermohydraulic and Energy-saving Performance of a Graphene Nanoplatelet-platinum Hybrid Nanofluid Inside a Manifold Microchannel Heat Sink," *Energy Engineering and Management*, Vol. 12, pp. 100-113, 2023, doi: <https://doi.org/10.22052/jeem.2023.113687>.

[4] J. Jaguemont, L. Boulon, and Y. Dubé, "A Comprehensive Review of Lithium-ion Batteries used in Hybrid and Electric Vehicles at Cold Temperatures," *Applied Energy*, Vol. 164, pp. 99-114, 2016/02/15 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>.

[5] Z. Rao, and S. Wang, "A Review of Power Battery Thermal Energy Management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 4554-4571, 2011/12/01 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>.

[6] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, "A General Energy Balance for Battery Systems," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 132, pp. 5-12, 1985/01/01 1985, doi: <https://dx.doi.org/10.1149/1.2113792>.

[7] S. Chen, C. Wan, and Y. Wang, "Thermal Analysis of Lithium-ion Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 140, pp. 111-124, 2005/01/10 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.05.064>.

[8] J. P. Holman, Heat Transfer (Si Units) Sie: Tata McGraw-Hill Education, Tenth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008, ISBN: 9780070634510.

[9] N. Omar, M. Daowd, P. Van Den Bossche, O. Hegazy, J. Smekens, T. Coosemans, and J. Van Mierlo, "Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles—Assessment of Electrical Characteristics," *Energies*, Vol. 5, pp. 2952-2988, 2012, doi: <https://doi.org/10.3390/en5082952>.

[10] N. Omar, M. Daowd, O. Hegazy, M. Al Sakka, T. Coosemans, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, "Assessment of Lithium-ion Capacitor for using in Battery Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicle Applications," *Electrochimica Acta*, Vol. 86, pp. 305-315, 2012/12/30 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.026>.

[11] A. Pfrang, A. Kriston, V. Ruiz, N. Lebedeva, and F. di Persio, "Safety of Rechargeable Energy Storage Systems with a Focus on Li-ion Technology," Chapter Eight - Safety of Rechargeable Energy Storage Systems with a Focus on Li-ion Technology, *Micro and Nano Technologies*, Elsevier Inc., Boston: Elsevier, 2017, pp. 253-290, ISBN: 978-0-323-42977-1, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-42977-1.00008-X>.

[12] V. Pop, H. Bergveld, P. Notten, J. O. het Veld, and P. P. Regtien, "Accuracy Analysis of the State-of-charge and Remaining Run-time Determination for Lithium-ion Batteries," *Measurement*, Vol. 42, pp. 1131-1138, 2009/10/01 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.03.009>.

- [13] 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," *Journal of Power Sources*, Vol. 128, pp. 292-307, 2004/04/05 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.070>.
- [14] M. Malik, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Review on use of Phase Change Materials in Battery Thermal Management for Electric and Hybrid Electric Vehicles," *International Journal of Energy Research*, Vol. 40, pp. 1011-1031, 2016/06/25 2016, <https://doi.org/doi:10.1002/er.3496>.
- [15] T. Sathish, D. B. Subramanian, K. MuthuKumar, and S. Karthick, "Air Pollution Control Water Heater by using Paraffin Wax from Municipal Wastes," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 33, pp. 2530-2534, 2020/01/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.032>.
- [16] J. G. Speight, *Fouling in Refineries*, 1st Edition, Gulf Professional Publishing, Houston, Texas, 2015, ISBN: 9780128007778.
- [17] K. Biswas, "Nano-based Phase Change Materials for Building Energy Efficiency," *Start-Up Creation*, pp. 183-211, 2016/01/01 2016, <https://doi.org/doi:10.1016/B978-0-08-100546-0.00009-1>.
- [18] W. Zhang, Z. Liang, W. Wu, G. Ling, and R. Ma, "Design and Optimization of a Hybrid Battery Thermal Management System for Electric Vehicle Based on Surrogate Model," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 174, p. 121318, 2021/08/01 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121318>.
- [19] G. Murali, G. Sravya, J. Jaya, and V. N. Vamsi, "A Review on Hybrid Thermal Management of Battery Packs and its Cooling Performance by Enhanced PCM," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 150, p. 111513, 2021/10/01 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111513>.
- [20] S. Al-Hallaj, and J. R. Selman, "Thermal Modeling of Secondary Lithium Batteries for Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 110, pp. 341-348, 2002/08/22 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00196-9).
- [21] S. Landini, J. Leworthy, and T. O'Donovan, "A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-ion Cells," *Journal of Energy Storage*, Vol. 25, p. 100887, 2019/10/01 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100887>.
- [22] J. Chen, S. Kang, E. Jiaqiang, Z. Huang, K. Wei, B. Zhang, H. Zhu, Y. Deng, F. Zhang, and G. Liao, "Effects of Different Phase Change Material Thermal Management Strategies on the Cooling Performance of the Power Lithium-ion Batteries: A Review," *Journal of Power Sources*, Vol. 442, p. 227228, 2019/12/01 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227228>.
- [23] N. Javani, I. Dincer, G. Naterer, and B. Yilbas, "Heat Transfer and Thermal Management with PCMs in a Li-ion Battery Cell for Electric Vehicles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 690-703, 2014/05/01 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.076>.

- [24] N. Javani, I. Dincer, G. Naterer, and G. Rohrauer, "Modeling of Passive Thermal Management for Electric Vehicle Battery Packs with PCM Between Cells," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, pp. 307-316, 2014/12/05 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.037>.
- [25] Y. Deng, H. Zhang, and X. Xia, "Experimental Investigation of Thermal Characteristics of Lithium-ion Battery using Phase Change Materials Combined with Metallic Foams and Fins," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016/08/01 2016, p. 012045, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/40/1/012045>.
- [26] A. Lazrak, J.-F. Fourmigué, and J.-F. Robin, "An Innovative Practical Battery Thermal Management System Based on Phase Change Materials: Numerical and Experimental Investigations," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 20-32, 2018/01/05 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.172>.
- [27] P. Kumar, D. Chaudhary, P. Varshney, U. Varshney, S. M. Yahya, and Y. Rafat, "Critical Review on Battery Thermal Management and Role of Nanomaterial in Heat Transfer Enhancement for Electrical Vehicle Application," *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, p. 102003, 2020/12/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102003>.
- [28] X. Chen, F. Zhou, W. Yang, Y. Gui, and Y. Zhang, "A Hybrid Thermal Management System with Liquid Cooling and Composite Phase Change Materials Containing Various Expanded Graphite Contents for Cylindrical Lithium-ion Batteries," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 200, p. 117702, 2022/01/05 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117702>.
- [29] J. T. Rajan, V. S. Jayapal, M. Krishna, K. M. Firose, S. Vaisakh, A. K. John, and A. Suryan, "Analysis of Battery Thermal Management System for Electric Vehicles using 1-Tetradecanol Phase Change Material," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 51, p. 101943, 2022/06/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101943>.
- [30] S. Mousavi, M. Siavashi, and A. Zadehkabir, "A New Design for Hybrid Cooling of Li-ion Battery Pack Utilizing PCM and Mini Channel Cold Plates," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 197, p. 117398, 2021/10/01 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117398>.
- [31] L. Yang, F. Zhou, L. Sun, and S. Wang, "Thermal Management of Lithium-ion Batteries with Nanofluids and Nano-phase Change Materials: A Review," *Journal of Power Sources*, Vol. 539, p. 231605, 2022/08/15 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231605>.
- [32] Y. Cao, I. B. Mansir, A. Mouldi, F. Aouaini, S. M. Bouzgarrou, R. Marzouki, M. Dahari, M. Wae-hayee, and A. Mohamed, "Designing a System for Battery Thermal Management: Cooling LIBs by Nano-encapsulated Phase Change Material," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 33, p. 101943, 2022/05/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101943>.
- [33] A. Qaderi, and F. Veysi, "Investigation of a Water-NEPCM Cooling Thermal Management System for Cylindrical 18650 Li-ion Batteries," *Energy*, Vol. 244, p. 122570, 2022/04/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122570>.

- [34] J. Guan, and M. Chen, "An Overview of Phase Change Materials on Battery Application: Modification Methods and Thermal Management Systems," *Journal of Energy Storage*, Vol. 103, p. 114268, 2024/12/01 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114268>.
- [35] P. Pierluca, and P. Davide, "Improved Thermal Management of Li-ion Batteries with Phase-change Materials and Metal Fins," *Batteries*, Vol. 10, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries10060190>.
- [36] Y. Dang, Y. Zou, Y. Song, B. Li, and X. Du, "Thermal Management of Lithium-ion Batteries Based on the Coupling of Liquid Cooling and Composite Phase Change Materials," *International Journal of Green Energy*, pp. 1-14, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2419941>.
- [37] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, "*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*," CRC Press, 2018, ISBN: 9781498761772.
- [38] M. Eidian, "*Numerical Investigation of the Effect of Flow Geometry and the use of Hybrid Nanofluid in the Cooling System of the Lithium-ion Battery of an Electric Car*," Master's Thesis, Kashan University, Iran, 2023, [in Persian].
- [39] A. D. Brent, V. R. Voller, and K. J. Reid, "Enthalpy–Porosity Technique for Modeling Convection–diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 297–318, 1988/04/01 1988, doi: <https://doi.org/10.1080/10407788808913615>.

Numerical Investigation of the Effect of using Phase Change Material on the Cooling of Lithium-ion Batteries of Electric Vehicles

*Corresponding author: **Mohammad reza babaei**

Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University, Badroud Branch,
Badroud, Iran
mr.babaei1360@iau.ac.ir

Ghanbar Ali Sheikhzadeh

Professor, Thermo-Fluids Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan,
Kashan, Iran
sheikhz@kashanu.ac.ir

Mohammad Eidian

M.Sc., Thermo-Fluids Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan,
Kashan, Iran
mohammadeydiyan8014@gmail.com

Abstract

In this study, the performance of different cooling methods including natural air circulation cooling, forced air circulation in the presence of a heat sink, forced air circulation with paraffin as phase change material, forced air circulation with paraffin and metal foam and forced air circulation with paraffin, foam and fin on cooling of lithium-ion batteries of electric vehicles have been investigated using numerical simulation. The results showed that when the battery temperature in the state of cooling with pure paraffin exceeds the allowed temperature of 55 degrees Celsius, for paraffin with metal foam and paraffin with metal foam and fins, the maximum temperature is 39.3 and 1.36 degrees Celsius, respectively. Therefore, metal foam and finned metal foam reduce the temperature by 29% and 34% respectively in the same period of time compared to pure paraffin, and even after 21 complete cycles with the change of production heat rate, the maximum temperature does not exceed the allowed temperature. At a relatively high temperature, the use of phasing materials along with conductivity amplifiers makes the hybrid cooling system more efficient than the forced displacement-heat well cooling system; In such a way that the allowed time span increases more than 11 times.

Keywords: Electric vehicle, Lithium-ion battery, Cooling, Phase change material, Metal foam