

تحلیل عددی مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون برای کاربردهای فضایی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

حمیدرضا بهرامی^۱، مهزیار قاعدی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، taleshbahrami@qut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی مدیریت حرارتی پک‌های باتری لیتیوم-یون (متشکل از سه سلول) در شرایط فضایی، که انتقال حرارت صرفاً از طریق تشعشع صورت می‌گیرد، می‌پردازد. چهار ماده تغییر فاز دهنده شامل n-ایکوزان، آرتی-۳۵، آرتی ۴۴ سی و تتراکانول در نرخ تخلیه ۵-سی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد آرتی-۳۵ با توجه به نقطه ذوب پایین‌تر در ابتدای فرآیند (تقریباً ۳۰۰ ثانیه) عملکرد بهتری دارد، اما در ادامه کارایی آن کاهش می‌یابد. سایر مواد تغییر فاز در پایان فرآیند تخلیه، دمای باتری را حدود ۱۰ کلوین کاهش دادند. برای بهبود هدایت حرارتی، نانوذرات اکسید برلیوم، اکسید زیرکونیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید تیتانیوم به تتراکانول اضافه شدند. در این میان، نانوذرات اکسید برلیوم مؤثرترین عملکرد را داشتند و دمای حداکثر را ۱/۲ کلوین کاهش دادند. همچنین، مشخص شد که هر ۱٪ افزایش در کسر حجمی اکسید برلیوم منجر به کاهش حدوداً یک کلوینی دمای باتری می‌شود. این یافته‌ها پتانسیل بالای ترکیبات مواد تغییر فاز دهنده-نانوذرات را در خنک‌کاری باتری‌های فضایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت حرارتی، باتری لیتیوم یون، بی‌سی‌ام، انتقال حرارت، بی‌وزنی

Numerical analysis of thermal management in lithium-ion batteries for space applications using phase change materials and nanoparticles

Hamid-Reza Bahrami¹, Mahziyar Ghaedi²

1- Assistant Professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

2- MSc, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

Abstract

This study investigates the thermal management of lithium-ion battery packs (comprising three cells) under space conditions, where heat transfer occurs exclusively through radiation. Four phase change materials (PCMs) - n-eicosane, RT-35, RT-44, and tetradecanol - were examined at a discharge rate of C5. Results demonstrated that RT-35, due to its lower melting point, exhibited superior performance during the initial phase (~300 seconds), though its efficiency diminished thereafter. The other PCMs reduced the battery temperature by approximately 10 K by the end of the discharge process. To enhance thermal conductivity, beryllium oxide, zirconium oxide, silicon oxide, and titanium oxide nanoparticles were incorporated into tetradecanol. Among these, beryllium oxide nanoparticles proved most effective, lowering the peak temperature by 1.2 K. Furthermore, it was determined that each 1% increase in beryllium oxide volume fraction resulted in an approximately 1 K reduction in battery temperature. These findings highlight the significant potential of PCM-nanoparticle composites for thermal regulation in space battery applications.

Keywords: thermal management, lithium-ion battery, PCM, heat transfer, microgravity.

۱۷۵

سال ۱۴ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۴

تشریح علمی

دانش و فناوری هورا فضا



با گسترش روزافزون کاربرد سامانه‌های برقی مبتنی بر باتری‌های لیتیوم-یونی، به‌ویژه در سامانه‌های پیشرفته و حیاتی، مدیریت حرارتی این باتری‌ها به ضرورتی کلیدی تبدیل شده است. کنترل دقیق پارامترهایی همچون سطح شارژ، دمای عملکرد، و حفظ ولتاژ در محدوده ایمن نقش بسزایی در جلوگیری از افت کارایی، تخریب زود هنگام و افزایش طول عمر مفید باتری‌ها ایفا می‌کند. در این راستا، راهکارهای گوناگونی برای پایش، تحلیل و کنترل حرارتی باتری‌ها به‌منظور ارتقای ایمنی، بهره‌وری عملکردی و دوام بلندمدت توسعه یافته‌اند [۷-۹].

این ضرورت در کاربردهای هوافضایی، به‌مراتب جدی‌تر و پیچیده‌تر جلوه می‌کند؛ جایی که وسایل نقلیه فضایی و ماهواره‌ها به‌طور مکرر در معرض شرایط محیطی متغیر و شدید، از جمله خلأ، تابش مستقیم خورشید، شار مادون قرمز و بازتاب‌های حرارتی زمین قرار می‌گیرند. تغییرات پیوسته در بارهای حرارتی ناشی از ورود و خروج از دید خورشید و عدم وجود همرفت طبیعی، موجب می‌شود که مدیریت حرارتی در این محیط‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ عملکرد پایدار، افزایش طول عمر و موفقیت مأموریت‌های فضایی ایفا کند [۱۰-۱۲].

استفاده از مواد تغییر فازدهنده (پی‌سی‌ام) در مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون به عنوان یک راهکار نوین و مؤثر، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این مواد با بهره‌گیری از ظرفیت گرمایی نهان بالا، می‌توانند تغییرات دما را در محدوده مشخصی کنترل کنند و از افزایش یا کاهش شدید دما جلوگیری نمایند [۱۳]. این ویژگی باعث کاهش خطر حرارت زدگی^۴ و بهبود ایمنی سیستم باتری می‌شود [۱۴]. علاوه بر این، استفاده از پی‌سی‌ام‌ها نیاز به سامانه‌های خنک‌کننده فعال را کاهش داده و در نتیجه مصرف انرژی را بهینه می‌سازد [۱۵]. این مواد به دلیل قابلیت تطبیق‌پذیری بالا، می‌توانند در سامانه‌های خنک‌کننده مختلفی مانند سامانه‌های هیبریدی با مایع خنک‌کننده مورد استفاده قرار گیرند و دوام و طول عمر بالایی را برای باتری‌ها فراهم کنند [۱۶]. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب

استفاده از باتری‌های لیتیوم-یونی^۱ در صنعت هوافضا سال‌هاست که مورد توجه قرار گرفته است. از سال ۲۰۰۱، مارش و همکارانش [۱]، امکان‌سنجی این فناوری را برای کاربردهای هوافضایی بررسی کردند. با گذشت زمان، باتری‌های لیتیوم-یونی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سیستم‌های نیکل-کادمیوم متداول شناخته شده‌اند، زیرا مزایای قابل‌توجهی همچون کاهش وزن، افزایش اطمینان‌پذیری و کاهش هزینه‌های چرخه عمر ارائه می‌دهند [۲]. این مزایا، از جمله در مأموریت‌های مریخ‌نورد، کاوشگرهای سیارات دوردست و ماهواره‌های مدار زمین، باعث شده است که این باتری‌ها به بخشی جدایی‌ناپذیر از مأموریت‌های فضایی تبدیل شوند [۳]. باتری‌های لیتیوم-یون در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از تأمین انرژی تجهیزات فضاوردان گرفته تا تضمین چرخه عمر طولانی‌تر برای مأموریت‌های مدار پایین زمین و افزایش عمر عملیاتی مأموریت‌های ژئوسنکرون یا سفر به سیارات دوردست، نقش ایفا می‌کنند. با پیشرفت‌های مداوم فناوری، تلاش‌ها بر بهبود عملکرد باتری، افزایش ظرفیت و ارتقای ویژگی‌های ایمنی متمرکز شده‌اند تا نیازهای سخت‌گیرانه کاربردهای هوافضایی را برآورده کنند [۴]. با پیشرفت‌های جاری، پیش‌بینی می‌شود باتری‌های لیتیوم-یونی نقش کلیدی در آینده اکتشافات فضایی و صنعت هوافضای تجاری ایفا کنند.

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی برای کاربردهای هوافضا باید الزامات سخت‌گیرانه‌ای را داشته باشند، از جمله محدوده عملکردی گسترده، عملکرد بالا، جرم و حجم کم، ایمنی، قابلیت اطمینان و مقرون‌به‌صرفه بودن را برآورده کنند. باتری‌های پیشرفته لیتیومی و لیتیوم-یونی در این زمینه‌ها برتری دارند و جایگزین باتری‌های سنگین‌تر و کم‌بازده‌تر مانند نیکل-کادمیم^۲ و سرب-اسید^۳ شده‌اند [۵]. باتری‌های لیتیوم-یون در محدوده دمایی وسیع (از -۴۰ تا +۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و محیط‌های کم‌فشار بدون نیاز به کنترل‌های حرارتی پیچیده به‌صورت ایمن و قابل‌اعتماد عمل می‌کنند [۶].



پی‌سی‌ام با سایر فناوری‌های مدیریت حرارتی، مانند صفحات خنک‌کننده و مینی کانال‌ها، می‌تواند عملکرد سیستم را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد و کاربرد این باتری‌ها را در شرایط مختلف محیطی امکان‌پذیر سازد [۱۷].

پی‌سی‌ام‌ها به دلیل عملکرد قابل‌اطمینان و طراحی ساده، برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یون در کاربردهای فضایی ترجیح داده می‌شوند. در مقابل، سامانه‌های فعال مانند خنک‌کننده‌های مایع و هوا به دلایلی برای فضا توصیه نمی‌شوند. این دستگاه‌ها به انرژی اضافی نیاز دارند، که در فضا به دلیل محدودیت منابع مانند پنل‌های خورشیدی، بهینه نیست [۱۳]. علاوه بر این، پیچیدگی مکانیکی آن‌ها، شامل اجزای متحرک مانند پمپ‌ها و فن‌ها، ریسک خرابی را افزایش می‌دهد و نگهداری آن‌ها در محیط خلأ عملاً غیرممکن است. همچنین، وزن و حجم بالای تجهیزات فعال، برای مأموریت‌های فضایی که محدودیت وزنی دارند، چالش‌برانگیز است. در محیط خلأ، کارایی سامانه‌های خنک‌کننده مایع کاهش می‌یابد، زیرا انتقال گرمای مؤثر به محیط خارجی وجود ندارد. در مقابل، پی‌سی‌ام‌ها بدون نیاز به اجزای متحرک یا منابع انرژی خارجی می‌توانند گرما را به‌طور مؤثری جذب و تخلیه کنند، که این ویژگی‌ها آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای فضا تبدیل می‌کند [۱۸].

در مواد تغییر فازدهنده، مکانیسم اصلی جذب و دفع حرارت از سامانه‌های تولیدکننده گرما، تغییر فاز و جذب/دفع گرمای نهان است. با این حال، این مواد معمولاً دارای رسانایی حرارتی پایینی هستند که توانایی آن‌ها را برای جذب سریع حرارت و انتقال آن در کل حجم محدود می‌کند [۱۹]. برای بهبود جذب حرارت و مدیریت حرارتی، افزایش رسانایی حرارتی یا بهبود سطح انتقال حرارت در داخل مواد ضروری است. روش‌های متعددی برای این منظور بررسی شده‌اند، از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی همچون استفاده از پره‌ها برای افزایش سطح انتقال حرارت [۲۰]، افزودن نانوذرات برای ارتقای رسانایی حرارتی [۲۱ و ۲۲]، استفاده از مواد متخلخل برای افزایش سطوح تماس داخلی [۲۳]، و ایجاد حرکت یا ارتعاش

در سیستم [۲۴] برای بهبود انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب اشاره کرد. کاهش زمان ذوب مواد تغییر فاز نشان‌دهنده توانایی آن‌ها در انتقال سریع‌تر حرارت در حجم خود است که به ذخیره انرژی و مدیریت حرارتی سریع‌تر منجر می‌شود.

با توجه به محدودیت‌های وزنی، استفاده از نانوذرات برای بهبود حرارتی باتری‌های فضایی با توجه به وزن کمی که اضافه می‌کنند، منطقی‌تر است. نانوذرات مختلفی به‌منظور بهبود قابلیت هدایت حرارتی پی‌سی‌ام‌ها مورد استفاده قرار داده شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به اکسیدهای فلزی مانند آلومینا^۵ [۲۵، ۲۶]، اکسید روی^۶ [۲۷]، اکسید مس^۷ [۲۸ و ۲۹] به دلیل پایداری شیمیایی بالا و تنوع خواص، اشاره کرد. همچنین، نانوذرات فلزی مانند مس [۳۰]، نقره [۳۱] و طلا [۳۲] به دلیل هدایت حرارتی بسیار بالا، در برخی کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانوذرات اکسیدهای غیرفلزی مانند سیلیس^۸ [۳۳]، سیلیسیم کاربید^۹ [۳۴] و نیتريد بور^{۱۰} [۳۵] نیز به دلیل پایداری شیمیایی بالا و عایق حرارتی بودن، در برخی کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همان‌طور که اشاره شد، طیف گسترده‌ای از نانوذرات برای ارتقای قابلیت هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به کار می‌روند. هر یک از این نانوذرات، مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. نانوذرات اکسیدهای فلزی مانند آلومینا، اکسید روی و اکسید مس، پایداری شیمیایی بالایی دارند و تنوع خواص آن‌ها امکان انتخاب نانوذره مناسب برای کاربردهای مختلف را فراهم می‌کند. با این حال، هدایت حرارتی آن‌ها نسبت به نانوذرات فلزی کمتر است [۳۶]. نانوذرات فلزی مانند مس، نقره و طلا، هدایت حرارتی بسیار بالایی دارند و به همین دلیل، در مواردی که بهبود قابل‌توجهی در انتقال حرارت مورد نیاز است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما هزینه بالا و این نانوذرات و چالش‌های مربوط به پایداری آن‌ها در برخی محیط‌ها، از محدودیت‌های آن‌ها به شمار می‌رود [۳۷]. نانوذرات اکسیدهای غیرفلزی مانند سیلیس، سیلیسیم کاربید و نیتريد بور، پایداری شیمیایی بالا و عایق حرارتی بودن دارند [۳۸ و ۳۹].





این ویژگی‌ها می‌تواند در برخی کاربردهای خاص مفید باشد، اما هدایت حرارتی آن‌ها نسبت به نانوذرات فلزی و برخی از اکسیدهای فلزی کمتر است.

نانوذرات برلیوم اکسید^{۱۱} به عنوان یک گزینه جذاب برای بهبود انتقال حرارت پی‌سی‌ام در باتری‌ها مطرح می‌شود. این نانوذرات، ترکیبی از مزایای نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی را دارا هستند. برلیوم اکسید دارای هدایت حرارتی بسیار بالا، پایداری شیمیایی خوب و چگالی کم است. چگالی کم برلیوم اکسید، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی مانند باتری‌های فضایی تبدیل می‌کند که محدودیت وزنی وجود دارد. علاوه بر این، برلیوم اکسید با پی‌سی‌ام سازگاری خوبی دارد و می‌تواند به‌طور یکنواخت در آن پراکنده شود. برلیوم اکسید در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از سامانه‌های مدیریت حرارتی در الکترونیک گرفته تا راکتورهای هسته‌ای به عنوان یک عنصر دیرگداز با عملکرد بالا در دماهای بسیار زیاد، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰-۴۲]. با این حال تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از این نانوذرات در مورد مدیریت حرارتی باتری‌ها نشده است. در ساخت باتری‌ها، انتخاب مواد مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از ویژگی‌های کلیدی مواد مورد استفاده در باتری‌ها، خاصیت عایق الکتریکی آن‌ها است. این ویژگی به این معناست که ماده مورد نظر اجازه عبور جریان الکتریکی را نمی‌دهد و از ایجاد اتصال کوتاه بین قطب‌های مثبت و منفی باتری جلوگیری می‌کند. اگر مواد به کار رفته در باتری‌ها هادی الکتریکی باشند، احتمال اتصال کوتاه و آسیب دیدن باتری به‌شدت افزایش می‌یابد. اما نکته مهم این است که نانوذراتی که در باتری‌ها برای بهبود عملکرد هدایتی پی‌سی‌ام‌ها استفاده می‌شوند نیز باید عایق الکتریکی باشند. در غیر این صورت، ممکن است به عنوان پل‌های رسانایی عمل کرده و باعث ایجاد اتصال کوتاه داخلی در باتری شوند. برلیوم اکسید علاوه بر خاصیت عایق الکتریکی بالا، هدایت حرارتی بسیار خوبی نیز دارد. به همین دلیل، برلیوم اکسید می‌تواند به عنوان یک ماده خنک‌کننده در باتری‌ها عمل کرده و از گرم شدن بیش‌ازحد آن‌ها جلوگیری

کند. در مقایسه با سایر اکسیدهای فلزی مانند آلومینا، برلیوم اکسید هدایت حرارتی به‌مراتب بالاتری دارد [۴۳]. نانوذرات فلزی مانند طلا، نقره و مس، به دلیل داشتن هدایت الکتریکی بسیار بالا، برای استفاده در باتری‌ها مناسب نیستند. اگرچه این نانوذرات هدایت حرارتی بالایی دارند و می‌توانند به بهبود انتقال حرارت در باتری کمک کنند، اما احتمال ایجاد اتصال کوتاه در باتری را به‌شدت افزایش می‌دهند. بنابراین، استفاده از نانوذرات فلزی در باتری‌ها توصیه نمی‌شود.

مروری بر منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای برای مدیریت حرارتی باتری‌ها در شرایط بی‌وزنی یا میکروگرهیتی با استفاده از کامپوزیت پی‌سی‌ام و نانوذرات انجام نشده است. علاوه بر این علی‌رغم مزایای قابل توجه نانوذره برلیوم اکسید، این نانوذره در مدیریت حرارتی باتری‌ها (حتی در شرایط معمول) نیز انجام نشده است. لذا این مقاله در نظر دارد تا این خلا تحقیقاتی را پر کند. بدین منظور یک پک باتری باتری استوانه‌ای در نظر گرفته شده و بررسی‌ها نیز به‌صورت عددی انجام می‌گیرد. اثر پارامترهای مختلف نظیر نوع پی‌سی‌ام، نوع نانوذره، کسر حجمی نانوذره و نرخ تخلیه بر وضعیت دمایی نانوذره بررسی خواهد شد.

۲- بیان مسئله و مدل‌سازی ریاضی

موضوع مورد مطالعه، پکیجی متشکل از سه باتری استوانه‌ای است که چیدمان کلی آن در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. برای ساده‌سازی تحلیل، مسئله در فضای دوبعدی بررسی می‌شود. هر یک سلول‌های باتری دارای قطر ۱۸ میلی‌متر بوده و با فاصله ۵ میلی‌متری از یکدیگر و دیواره محفظه قرار گرفته‌اند. عرض پک باتری ۷۰ میلی‌متر است و طول آن متناسب با تعداد و ابعاد باتری‌ها تعیین می‌شود. سطوح فوقانی و تحتانی پک، با ضریب جذب ۰٫۸۲، به محیط اطراف با دمای ۲۹۸٫۱۵ کلوین تابش حرارتی دارند. فضای بین باتری‌ها به‌منظور مدیریت حرارتی با یک ماده تغییر فاز دهنده پر شده است. همچنین، فرض می‌شود که دو دیواره جانبی پک عایق حرارتی هستند.

ویسکوزیته (Pa.s)	۰/۰۱۳۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳
دمای انجماد (کلوین)	۳۰۹/۱۵	۳۰۱/۱۵	۳۱۴/۱۵	۳۰۸/۱۵
دمای ذوب (کلوین)	۳۱۱/۱۵	۳۱۳/۱۵	۳۱۷/۱۵	۳۱۰/۱۵
ضریب انبساط	$۱/۰۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱۰^{-۳}$	$۰/۰۰۲۵۹$	$۰/۰۸۵ \times ۱۰^{-۳}$
گرمای نهان (kJ/kg)	۲۲۷۰۰۰	۱۵۷۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۴۷۰۰۰

جدول ۲- خواص نانوذرات مورد استفاده [۴۸-۴۶]

نانوذره / خاصیت	BeO	ZrO ₂	TiO ₂	SiO ₂
چگالی (kg/m ³)	$۹۰۰ - ۶۳ \left(\frac{T - ۱۲۰۰}{۵۳۰} \right) - ۳ \left(\frac{T - ۱۲۰۰}{۵۳۰} \right)^۲ + ۲/۶ \left(\frac{T - ۱۲۰۰}{۵۳۰} \right)^۳ + ۰/۲۱ \left(\frac{T - ۱۲۰۰}{۵۳۰} \right)^۴$	۵۶۸۰	۴۲۵۰	۲۴۰
حرارت مخصوص (kJ/kg.K)	$۱۹۰۰۲۰۰ \left(\frac{T - ۶۵۰}{۳۶۰} \right) - ۱۲۰ \left(\frac{T - ۶۵۰}{۳۶۰} \right)^۲ + ۳۶ \left(\frac{T - ۶۵۰}{۳۶۰} \right)^۳$	۵۰۲	۶۸۶/۲	۲۲۲۰
قابلیت هدایت حرارتی (W/m.K)	$۳/۶۴ \times ۱۰^{-۴} \times T^۲ - ۷/۷۷ \times ۱۰^{-۱} \times T + ۴/۴۶ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۷	۸/۹۵۴	۱/۳۸

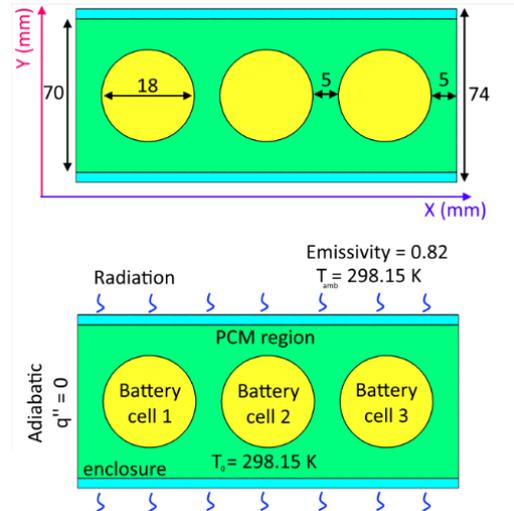
۲-۲- مدل سازی ریاضی

لازم است خواص اصلاح شده پی سی ام پس از افزودن نانوذرات بر اساس کسر حجمی نانوذرات در پی سی ام (ϕ_{np}) محاسبه شود. چگالی، ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت حرارتی پی سی ام تقویت شده با نانوذرات با استفاده از عبارات زیر محاسبه می شوند [۴۹].

$$\rho_{npcm} = \phi_{np} \rho_{np} + (1 - \phi_{np}) \rho_{pcm} \quad (۱)$$

$$(\rho C_p)_{npcm} = \phi_{np} (\rho C_p)_{np} + (1 - \phi_{np}) (\rho C_p)_{pcm} \quad (۲)$$

در منابع و مقالات، همبستگی های تجربی متعددی برای محاسبه هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی پی سی ام تقویت شده با نانوذرات (NEPCM) وجود دارد که هرکدام مزایا و محدودیت های خود را



شکل ۱. شماتیک مسئله مورد بررسی در این تحقیق

فرض می شود حرارت به صورت یکنواخت درون سلول های باتری در جریان تخلیه ۱C برابر با ۲۵ کیلو وات بر مترمکعب، برای جریان تخلیه ۳C برابر با ۲۲۵ کیلووات بر مترمکعب و برای جریان تخلیه ۵C برابر با ۶۲۵ کیلووات بر مترمکعب است [۴۴]. جنس پی سی ام موضوع مورد مطالعه است. علاوه بر این برای بهبود قابلیت هدایت حرارتی باتری ها نیز از نانوذرات استفاده خواهد شد.

۲-۱- خواص مواد مورد استفاده

در این مطالعه از سه نوع پی سی ام مختلف استفاده شده که خواص آن در جدول ۱ ارائه شده است. همین طور در این مطالعه از چهار نوع نانوذره مختلف استفاده می شود که خواص آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. خواص پی سی ام های مورد استفاده [۴۵]

ماده / خاصیت	Tetradecanol	RT-35	RT-44	n-Eicosane
چگالی (kg/m ³)	جامد: ۸۷۳/۴ مایع: ۸۲۱/۶	جامد: ۸۸۰ مایع: ۷۶۰	جامد: ۸۰۰ مایع: ۷۰۰	جامد: ۸۱۵ مایع: ۷۸۰
حرارت مخصوص (kJ/kg.K)	جامد: ۲۰۴۰ مایع: ۲۳۶۰	جامد: ۱۸۰۰ مایع: ۲۴۰۰	جامد: ۲۰۰۰ مایع: ۲۴۰۰	جامد: ۱۹۲۰ مایع: ۲۱۳۲
قابلیت هدایت حرارتی (W/m.K)	جامد: ۰/۲۵۲ مایع: ۰/۱۵۹	جامد: ۰/۲ مایع: ۰/۱	جامد: ۰/۲ مایع: ۰/۱	جامد: ۰/۴۱۲ مایع: ۰/۱۴۸



دارند [۵۰-۵۴]. هدایت حرارتی λ_{npcm} و ویسکوزیته دینامیکی μ_{npcm} پی‌سی‌ام تقویت‌شده با نانوذرات با استفاده از همبستگی‌های زیر محاسبه می‌شوند، زیرا این همبستگی‌ها ساده هستند و در موارد بسیاری استفاده می‌شوند [۵۵ و ۵۶]. علاوه بر این، همبستگی هدایت حرارتی (معادله ماکسول) توافق خوبی با داده‌های تجربی نشان داده است [۵۷].

$$\lambda_{npcm} = \lambda_{pcm} \times \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{pcm} - 2(\lambda_{pcm} - \lambda_{np})\phi_{ny}}{\lambda_{np} + 2\lambda_{pcm} + (\lambda_{pcm} - \lambda_{np})\phi_{np}} \quad (3)$$

$$\mu_{npcm} = \frac{\mu_{pcm}}{(1 - \phi_{np})^{2.5}} \quad (4)$$

به دلیل سرعت پایین مایع در طول فرآیند ذوب و ماهیت سیال، جریان را می‌توان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. با این حال، تغییرات جزئی در چگالی که محرک جریان طبیعی هستند را می‌توان در معادلات مومنتوم لحاظ کرد. بنابراین، معادله پیوستگی برای تحلیل دوبعدی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۵۸]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5)$$

با استفاده از تقریب بوسینسک برای در نظر گرفتن اثرات جریان طبیعی ناشی از تغییرات چگالی ناشی از دما در پی‌سی‌ام مایع، معادله مومنتوم برای جریان سیال، که به عنوان جریان لایه‌ای و نیوتنی مشخص می‌شود، را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد [۵۹]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_{npcm} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu_{npcm} (\nabla^2 \vec{V}) - \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} - A_m \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} \vec{V} \quad (6)$$

تأثیرات شناوری و فرآیند تغییر فاز از طریق جملات دوم و سوم خود در معادله مومنتوم لحاظ می‌شوند. برای محاسبه جمله مرتبط با تغییر فاز، از روش آنتالی-تخلخل استفاده می‌شود که شامل ضریب منطقه دوفازی (A_m) با مقداری برابر با 10^5 است. این مقدار از طریق روش‌های اعتبارسنجی و بینش‌های حاصل از ادبیات موجود تعیین شده است [۶۰-۶۲]. لازم به ذکر است که این جمله مربوط به

تغییر فاز زمانی که پی‌سی‌ام در حالت جامد است ($\lambda = 0$) یا زمانی که کاملاً مایع است ($\lambda = 1$) برابر صفر می‌شود. کسر ذوب پی‌سی‌ام در معادله مومنتوم همان طور که در فرمول زیر نشان داده شده است، بر اساس دمای آن محاسبه می‌شود [۶۳]:

$$\lambda = \frac{\Delta H}{L_f} = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_S \\ 1 & \text{if } T > T_L \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{if } T_S \leq T \leq T_L \end{cases} \quad (7)$$

معادله بقای انرژی به صورت نوشته می‌شود [۶۴]:

$$\frac{(\rho C_p)_{npcm} \partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_{npcm} \nabla(\vec{V}T) = k_{npcm} \nabla(\nabla T) - \quad (8)$$

$$\frac{\rho_{npcm} L_f \partial \lambda}{\partial t} + \rho_{npcm} L_f \nabla(\vec{V}\lambda)$$

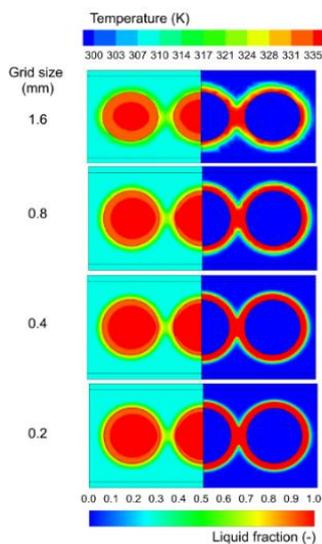
شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent 2021R² و در قالب کد دوبعدی با دقت مضاعف (2ddp) اجرا شدند. الگوریتم کوپل فشار برای حل معادلات مومنتوم و پیوستگی به کار گرفته شد. بردار گرانش با مقدار صفر در نظر گرفته شده تا شرایط میکروگرویتی و بی‌وزنی شبیه‌سازی شود. روش گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم برای جمله‌ی انتقال، تفاضل مرکزی برای جمله‌ی پخش و روش گسسته‌سازی ضمنی مرتبه دوم برای جمله‌ی گذرا به کار برده شدند. روش درون‌یابی فشار PRESTO برای محاسبات گذرا پیاده‌سازی شد. ضرایب زیر تخفیف برای چگالی، مومنتوم، تصحیح فشار، انرژی حرارتی و کسر ذوب به ترتیب ۱، ۰.۰۷، ۰.۰۳، ۱ و ۰.۰۹ در نظر گرفته شدند. شبکه نیز با استفاده از قابلیت Ansys Meshing ایجاد شده است.

۲-۳- مطالعه استقلال حل از شبکه

مطالعه استقلال حل از شبکه یکی از مراحل ضروری در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی است که به بررسی تأثیر اندازه و تعداد سلول‌های شبکه بر نتایج شبیه‌سازی می‌پردازد. هدف از این بررسی، اطمینان از آن است که نتایج نهایی به ساختار شبکه وابسته نبوده و با تغییرات جزئی در شبکه تغییر

۲-۴- مطالعه استقلال حل از گام زمانی

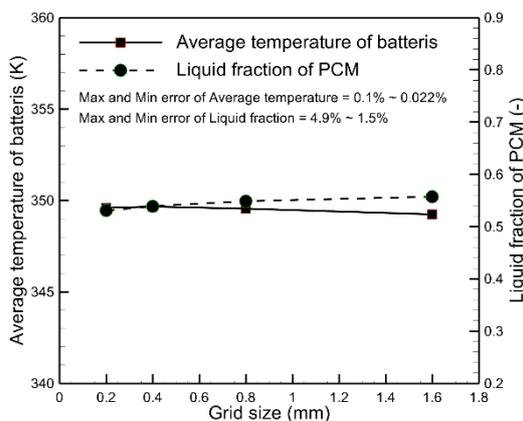
مطالعه استقلال حل از گام زمانی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی به‌اندازه استقلال حل از شبکه مهم بوده و نقش کلیدی در دقت و پایداری نتایج دارد. گام زمانی به عنوان کوچک‌ترین بازه زمانی برای محاسبه تغییرات میدان جریان، به محققان اجازه می‌دهد تا تغییرات سریع جریان را به‌دقت مدل‌سازی کنند بدون آنکه پایداری حل به خطر بیفتد. با انجام این مطالعه، می‌توان اطمینان حاصل کرد که نتایج شبیه‌سازی مستقل از گام زمانی بوده و به واقعیت فیزیکی نزدیک‌تر است. همچنین، این مطالعه به یافتن بهترین گام زمانی برای رسیدن به تعادلی بین دقت و هزینه محاسباتی کمک می‌کند. سه گام زمانی مختلف برای شبکه بهینه به دست آمده در بخش قبل، بررسی شده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، گام زمانی در محدوده بررسی شده تأثیر زیادی بر روی نتایج ندارد. باین‌حال، ریزترین گام زمانی یعنی یک ثانیه برای ادامه کار مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این گام زمانی در سایر مقالات نیز برای بررسی ذوب پی‌سی‌ام مورد استفاده قرار گرفته است [۶۷-۶۵].



شکل ۳. کانتورهای دما و کسر مایع در ریزی مختلف شبکه‌ها

محسوسی نداشته باشند. این موضوع دقت و اعتبار نتایج عددی را تضمین می‌کند. در این بخش، مطالعه استقلال حل از شبکه برای ماده تغییر فاز دهنده آن آیکوزان در شرایط بی‌وزنی و نرخ تخلیه ۵-سی انجام شده است. به‌منظور ارزیابی دقت نتایج عددی، شبکه‌هایی با اندازه‌های متفاوت بررسی شده‌اند و تحلیل نتایج بر مبنای میانگین دمای باتری‌ها و کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده در انتهای فرآیند تخلیه صورت گرفته است.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبکه‌ای با اندازه المان ۰٫۴ میلی‌متر با نتایج حاصل از ریزترین شبکه مورد بررسی (۰٫۲ میلی‌متر، شکل ۲) نشان می‌دهد که دقت نتایج همچنان در سطح قابل قبولی باقی می‌ماند. به‌طور مشخص، اختلاف نسبی میانگین دمای باتری‌ها تنها ۰٫۰۰۲۲٪ و اختلاف کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده حدود ۱٫۵٪ محاسبه شده است. با در نظر گرفتن این میزان خطا که بسیار ناچیز است، و همچنین کاهش قابل توجه در زمان و هزینه محاسباتی، شبکه با اندازه ۰٫۴ میلی‌متر به‌عنوان گزینه بهینه برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. نمای کلی از این شبکه بهینه در شکل ۴ ارائه شده است. در شکل ۳ کانتور این دو پارامتر کلیدی نسبت به اندازه شبکه ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با ریزتر شدن شبکه تا اندازه ۰٫۲ میلی‌متر، تغییرات نتایج به مقدار ناچیزی کاهش یافته که بیانگر همگرایی مناسب حل عددی است.

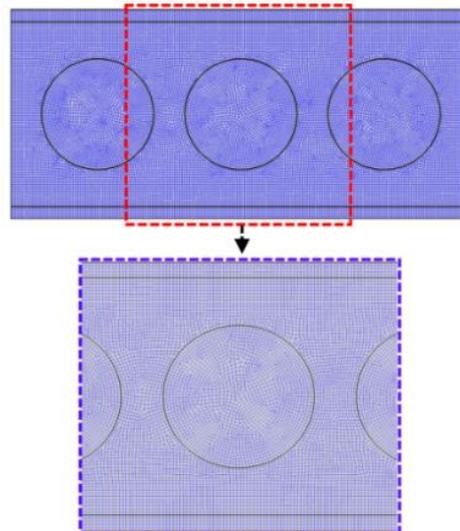


شکل ۲. مقایسه اختلاف شبکه‌های مختلف

مقایسه مدل عددی حاضر با مطالعه بن خدر و همکاران [۶۸] در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه ملاحظه می شود، نتایج مطالعه فعلی همخوانی خوبی با نتایج پژوهش مذکور دارد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت اثر جنس پی سی ام بر روی عملکرد پک باتری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همان طور که در بخش های قبل گفته شده چهار نوع پی سی ام مختلف شامل این-آیکوزان، آرتی-۳۵، سی، آرتی ۴۴ سی، و تترادکانول برای پروفیل دشارژ ۵C مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج این تحلیل برای دمای متوسط و ماکزیمم پک باتری در شکل ۶ و شکل ۷ و برای کسر ذوب در شکل ۸ ارائه شده است. ملاحظه می شود که آرتی-۳۵ سی بسیار زودتر از بقیه ذوب می شود. این موضوع در کنترل دمای ماکزیمم باتری بسیار مؤثر بوده و از افزایش دمای ماکزیمم جلوگیری می کند. هرچند دمای متوسط خود نیز از اهمیت بالایی برخوردار است و در طول عمر مفید باتری ها مؤثر است اما دمای ماکزیمم از اهمیت بالاتری برخوردار است. چراکه معمولاً شکست از نقطه ای آغاز می شود که بیشترین دما را تجربه می کند. اگرچه که آرتی-۳۵ سی عملکرد خوبی حداقل به لحاظ دمای ماکزیمم در ابتدای کار دارد اما به دلیل ظرفیت حرارتی نسبتاً پایینی که نسبت به سایر پی سی ام ها دارد، در ادامه دمای آن به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین شاید بتوان گفت که تا زمان ۱۲۰ ثانیه کارکرد آرتی-۳۵ بهینه بوده و پس از آن قابل قبول نیست. سایر پی سی ام ها اگرچه که مقداری تفاوت دارند اما در نهایت همگی عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. برای مقایسه بهتر جدول ۴ را می توان مورد ملاحظه قرار داد. همان طوری که دیده می شود به غیر از آرتی-۳۵ سی که تقریباً در دمای ماکزیمم و متوسط حدود ۳۶۰ کلوین کار خود را پایان می دهد سایر پی سی ام ها در نهایت به دمای تقریباً ۳۵۰ کلوین یعنی ۱۰ درجه کمتر می رسند.



شکل ۴. شبکه انتخاب شده بر اساس مطالعه استقلال حل از شبکه

جدول ۳- پارامترهای مختلف مورد مطالعه در استقلال حل از شبکه

دمای متوسط باتری در ۷۲۰ ثانیه (کلوین)	دمای متوسط باتری در ۵۰۰ ثانیه (کلوین)	کسر ذوب در ۷۲۰ ثانیه	شروع ذوب (ثانیه)	گام زمانی (ثانیه)
۳۴۹/۶۷	۳۳۵/۵۴	۰/۵۳۹	۸۰	۱
۳۴۹/۶۶	۳۳۵/۵۳	۰/۵۳۹	۸۰	۲
۳۴۹/۶۴	۳۳۵/۵۱	۰/۵۳۹	۸۰	۴

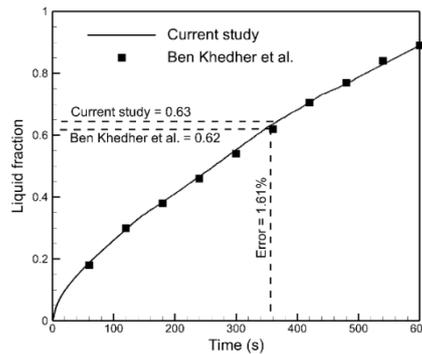
۲-۵- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل عددی حاضر با نتایج مطالعه بن خدر و همکاران [۶۸] صورت پذیرفت. برای این منظور، یک ذخیره ساز انرژی نهان پوسته-لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده RT-35 در نظر گرفته شد. تمام اجزای سیستم از جنس مس ساخته شده و ابعاد آن ها به شرح زیر است: قطر داخلی لوله داغ ۲۰ میلی متر، قطر خارجی لوله ۸۰ میلی متر، ضخامت فین ها ۲ میلی متر و طول فین ها ۲۰ میلی متر. شرایط اولیه نیز مطابق با مطالعه مذکور در نظر گرفته شد؛ به طوری که دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده ۲۸۳ کلوین (۱۰ درجه سانتی گراد) و دمای لوله داغ داخلی ۳۳۳ کلوین (۶۰ درجه سانتی گراد) بوده است. نتایج

جدول ۴: دمای حداکثر و دمای متوسط پک باتری‌ها در

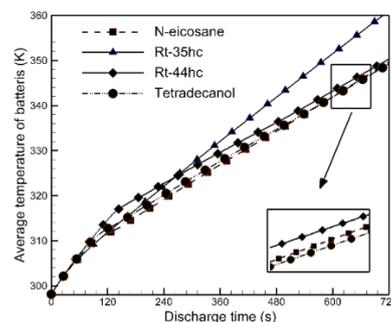
انتهای زمان عملکرد

نوع پی‌سی‌ام	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلون	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلون
این-آیکوزان	۳۵۱٫۸۶	۳۴۹٫۶۷
آرتی-۳۵ سی	۳۶۳٫۲۹	۳۶۱٫۰۱
آرتی-۴۴ سی	۳۵۲٫۷۶	۳۵۰٫۲۳
تترادکانول	۳۵۱٫۴۲	۳۴۹٫۲۳



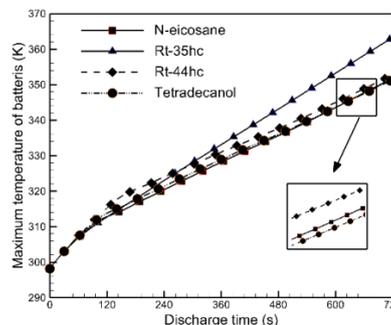
شکل ۵: مقایسه نتایج مطالعه حاضر و بن‌خدر و همکاران

[۶۸]



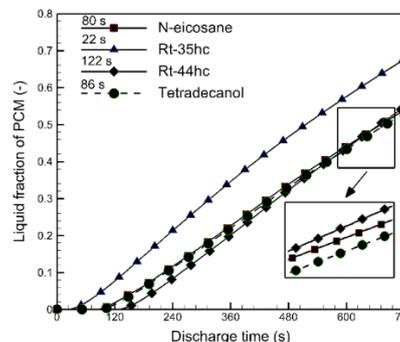
شکل ۶: اثر نوع پی‌سی‌ام بر روی دمای متوسط پک

باتری



شکل ۷: اثر نوع پی‌سی‌ام بر روی دمای ماکزیمم پک

باتری



شکل ۸: اثر نوع پی‌سی‌ام بر روی کسر مایع

برای درک بهتر فرایند می‌توان توزیع دمای درون باتری در زمان‌های ۵۰۰ و ۷۲۰ ثانیه را مطابق شکل ۹ در نظر گرفت. همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود بیشترین دما را سلول وسطی تجربه می‌کند. این بدین خاطر است که از دو طرف توسط دو سلول داغ محاط شده و به دلیل گرادیان دمای پایینی که در آن محل‌ها وجود دارد امکان انتقال حرارت ندارد. ضمن اینکه به خوبی مشخص است که سلول‌های موجود با استفاده از پی‌سی‌ام آرتی-۳۵ سی به رنگ قرمز پر رنگ هستند که نشان می‌دهد دما در آن‌ها بالاتر است. همین‌طور ملاحظه می‌شود که تترادکانول کمترین مساحت رنگ قرمز در زمان نهایی تخلیه را دارد که نشان می‌دهد عملکرد نسبی بهتری نسبت به سایرین دارد. پارامتر مفید دیگری که می‌توان به آن استناد کرد تفاوت دمای باتری وسطی با باتری‌های کناری است. این پارامتر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تا نیمی از زمان کل فرایند تخلیه، آرتی-۳۵ سی بهترین عملکرد را دارد. این پدیده عمدتاً به این خاطر است که این پی‌سی‌ام دارای دمای ذوب نسبتاً پایینی نسبت به سایرین است. به همین دلیل این ماده سریع ذوب شده و از افزایش در هر سه باتری جلوگیری می‌کند. در صورتی که سایر پی‌سی‌ام‌ها در دمای بالاتری ذوب می‌شوند. بنابراین همچنان که دمای باتری‌های مجاور افزایش می‌یابد دمای باتری وسطی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه فرایند ذوب آغاز شود. بنابراین اگر زمان عملکرد کمتر مورد نیاز است، پی‌سی‌ام آرتی-۳۵ پیشنهاد می‌شود.

علی‌رغم اینکه تفاوت تترادکانول با دو مورد پی‌سی‌ام بهینه دیگر تفاوت چشمگیری ندارد،

۱۸۳

سال ۱۴ - شماره ۱

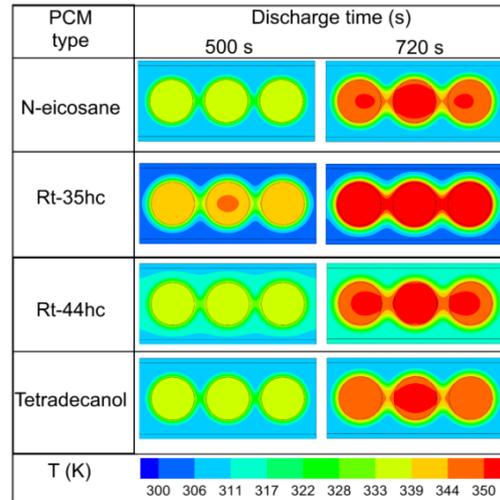
بهار و تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



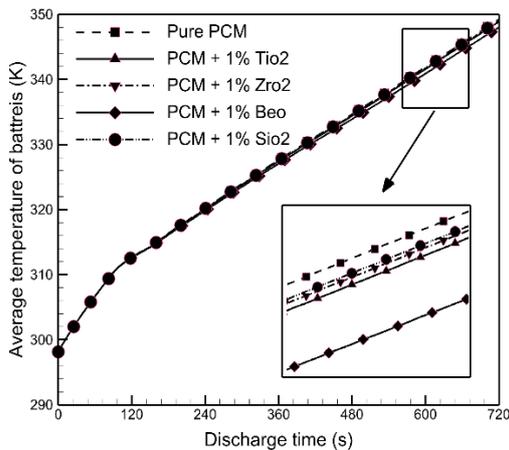
تحلیل عددی مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیم-یون برای کاربردهای فضایی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات

با این حال این پی‌سی‌ام برای مطالعات بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل ۹: توزیع دمای درون باتری در زمان ۵۰۰ و ۷۲۰ ثانیه

مدل‌سازی ریاضی داده شد، در حالت حدی (زمانی که قابلیت هدایت حرارتی نانوذره در قیاس با قابلیت هدایت حرارتی پی‌سی‌ام بسیار زیاد باشد) میزان افزایش قابلیت هدایت حرارتی ترکیب پی‌سی‌ام مستقل از نوع نانوذره و بیشتر تابعی از غلظت آن است. مطابق جدول ۵ ملاحظه می‌شود که از بین نانوذرات انتخاب شده برلیوم اکسید بهترین شرایط را دارد به طوری که در زمان نهایی دما را در حدود ۱۰۲ درجه کاهش می‌دهد.

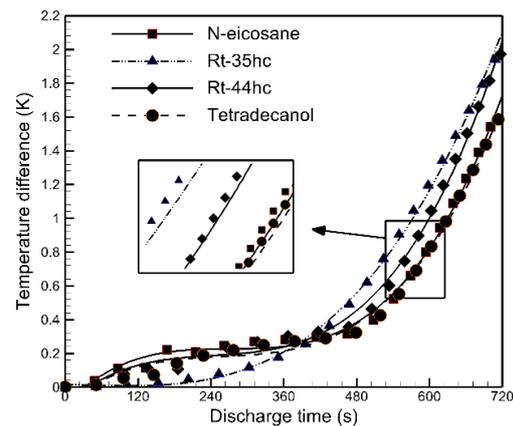


شکل ۱۱: تأثیر افزودن نانوذرات مختلف بر عملکرد باتری

جدول ۵: تأثیر نوع پی‌سی‌ام مورد استفاده بر دمای ماکزیمم در انتهای فرایند تخلیه

نوع پی‌سی‌ام	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلوین	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلوین
پی‌سی‌ام خالص	۳۵۱/۴۲	۳۴۹/۲۳
پی‌سی‌ام + ۱% TiO ₂	۳۵۱/۰۸	۳۴۸/۸۶
پی‌سی‌ام + ۱% ZrO ₂	۳۵۱/۱۸	۳۴۸/۹۶
پی‌سی‌ام + ۱% BeO	۳۵۰/۱۷	۳۴۸/۰۱
پی‌سی‌ام + ۱% SiO ₂	۳۵۱/۲۴	۳۴۹/۰۲

افزایش کسر حجمی نانوذره می‌تواند بر بهبود قابلیت هدایت حرارتی کامپوزیت نانوذره-پی‌سی‌ام



شکل ۱۰: اختلاف دمای باتری وسطی با باتری‌های کناری عملکرد پی‌سی‌ام را می‌توان با افزودن نانوذرات نیز بهتر کرد. چهار نانوذره مختلف شامل اکسیدهای برلیوم، زیرکانیم، سیلیکون و تیتانیوم مورد بررسی قرار داده شده‌اند. این نانوذرات به‌عمد از غیر فلزات انتخاب شده‌اند که مشکلات الکتریکی مانند اتصال کوتاه ایجاد نکنند. نوع پی‌سی‌ام مورد استفاده در این بخش تترادکانول و نرخ تخلیه ۵C است. نتایج برای دمای متوسط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که به‌طور کلی افزودن یک درصد از هر نانوذره‌ای تأثیر اندکی بر دمای متوسط باتری‌ها دارد. با توجه به رابطه‌ای که برای قابلیت هدایت حرارتی ترکیب نانوذره و پی‌سی‌ام که در بخش

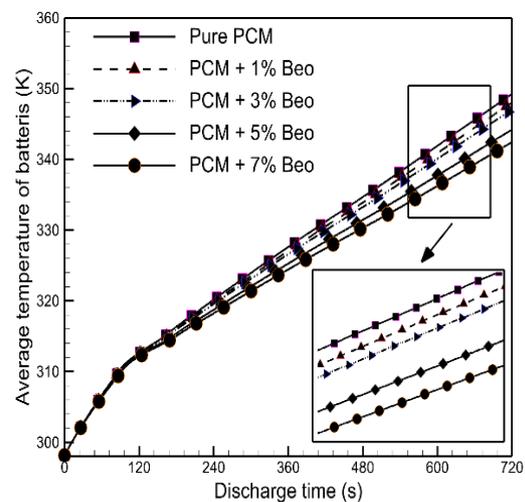
جدول ۶: اثر کسر حجمی نانوذره بر دمای متوسط و

ماکزیمم نهایی

نوع پی‌سی‌ام	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلوین	دمای ماکزیمم در انتهای بازه زمانی کارکرد بر حسب کلوین
پی‌سی‌ام خالص	۳۵۱،۴۲	۳۴۹،۲۳
+ پی‌سی‌ام ۱٪ Beo	۳۵۰،۱۷	۳۴۸،۰۱
+ پی‌سی‌ام ۳٪ Beo	۳۴۹،۱۷	۳۴۷،۰۲
+ پی‌سی‌ام ۵٪ Beo	۳۴۶،۳۲	۳۴۴،۲
+ پی‌سی‌ام ۷٪ Beo	۳۴۴،۵۲	۳۴۲،۴۲

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر مدیریت حرارتی باتری، C-Rate یا نرخ تخلیه است که بیانگر سرعت تخلیه انرژی ذخیره شده در باتری نسبت به ظرفیت کل آن است. نرخ تخلیه بالا (C-Rate) بزرگ‌تر) به معنای تخلیه سریع‌تر انرژی بوده و منجر به تولید گرمای بیشتر در باتری می‌شود. این امر می‌تواند باعث افزایش دمای باتری و تأثیر منفی بر عملکرد، عمر مفید و ایمنی آن شود. از سوی دیگر، نرخ تخلیه پایین‌تر (C-Rate کوچک‌تر) به باتری اجازه می‌دهد حرارت کمتری تولید کرده و فرآیند انتقال حرارت به شکل مؤثرتری انجام شود. در طراحی سیستم‌های مدیریت حرارتی، نوع خنک‌کننده و نحوه توزیع حرارت باید با در نظر گرفتن C-Rate انجام شود تا تعادل بهینه‌ای میان حفظ دمای مطلوب و تخلیه انرژی حاصل شود. ر این مطالعه، سه نرخ تخلیه 1C، 3C و 5C مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ تخلیه، تأثیر کامپوزیت پی‌سی‌ام و نانوذره (اکسید برلیوم با کسر حجمی یک درصد) به طور قابل توجهی پررنگ‌تر می‌شود. علت این پدیده این است که در نرخ‌های تخلیه پایین، حرارت با سرعت کمتری در داخل باتری تولید شده و زمان کافی برای انتقال حرارت از طریق هدایت و در نهایت دفع آن به صورت تشعشع به محیط وجود دارد. اما در نرخ‌های تخلیه بالا، به دلیل عدم وجود زمان کافی برای انتشار حرارت، انرژی تولید شده در نزدیکی باتری تجمع

مؤثر باشد. در این قسمت اثر کسر حجمی‌های مختلف نانوذره در پی‌سی‌ام مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این کار چهار کسر حجمی ۱، ۳، ۵ و ۷ برلیوم اکسید در نرخ تخلیه ۵C مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج این بررسی در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش کسر حجمی نانوذره قابلیت هدایت حرارتی کامپوزیت پی‌سی‌ام-نانوذره بهبود یافته و در نتیجه پخش حرارت بهتر شده و بالطبع نرخ افزایش دمای باتری‌ها کاهش می‌یابد.



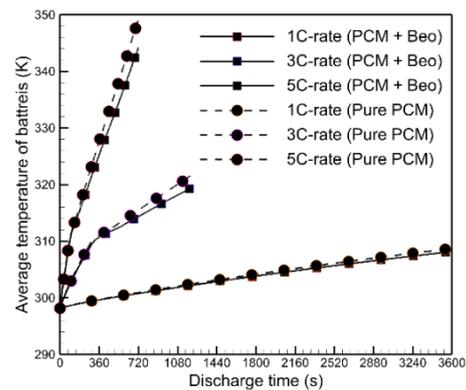
شکل ۱۲: اثر کسر حجمی نانوذره بر عملکرد حرارتی باتری

برای درک بهتر اثر افزودن نانوذره بر عملکرد پک باتری در زمان نهایی جدول ۶ را می‌توان در نظر گرفت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزودن هر یک درصد کسر حجمی نانوذره به گامم دمای ماکزیمم تقریباً یک درجه کاهش می‌یابد. به طوریکه در با استفاده از ۷ درصد کسر حجمی نانوذره دما تقریباً هفت درجه کاهش می‌یابد. البته قابل توجه است که درصدهای بالای نانوذره در کاربردهای عملی توصیه نمی‌شود چراکه درصد بالای نانوذرات ممکن رسوب یا تجمع و خوشه‌ای شدن نانوذرات را تسریع کرده و عملکرد کامپوزیت نانوذره-پی‌سی‌ام را با مشکل مواجه کند.

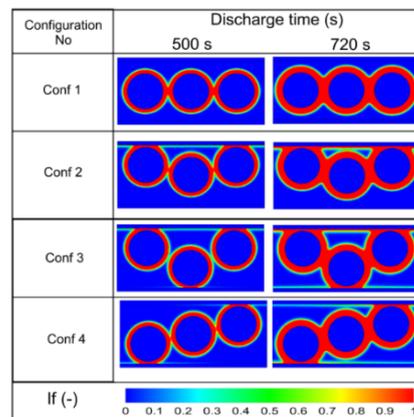


کرده و منجر به افزایش دما می‌شود. این موضوع نقش مهمی در بهبود عملکرد سیستم مدیریت حرارتی، به‌ویژه در شرایط با نرخ تخلیه بالا، ایفا می‌کند.

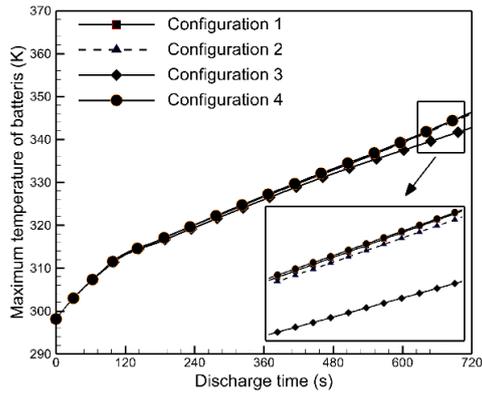
چیدمان باتری‌ها درون پک یکی از عوامل مهم در عملکرد حرارتی سیستم است. هرچه فاصله بین باتری‌ها بیشتر باشد و باتری‌ها به سطح خارجی پک نزدیک‌تر قرار گیرند، انتقال حرارت به محیط به شکل موثرتری انجام می‌شود. این طراحی باعث کاهش تجمع حرارت در مرکز پک شده و امکان دفع حرارت از طریق هدایت و تشعشع را افزایش می‌دهد، که به ویژه در شرایط با نرخ تخلیه بالا، عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد. چهار چیدمان مختلف مطابق شکل ۱۴ برای این مسئله در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که مطابق با شکل ۱۵، چیدمان شماره سه بهترین عملکرد را دارد. در این چیدمان به طور موثری از سطوح خارجی به منظور بهبود انتقال حرارت باتری استفاده شده است.



شکل ۱۳: اثر نرخ تخلیه بر مدیریت حرارتی باتری



شکل ۱۴: اثر چیدمان مختلف سه باتری درون پک بر کسر مایع

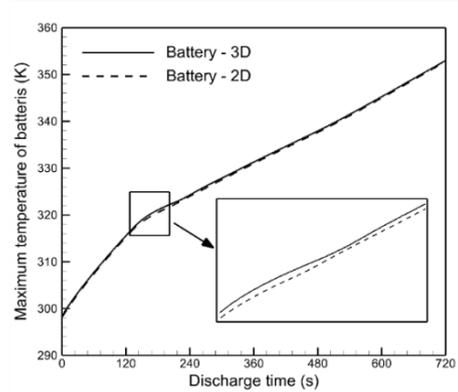


شکل ۱۵- اثر چیدمان مختلف سه باتری درون پک بر کسر مایع

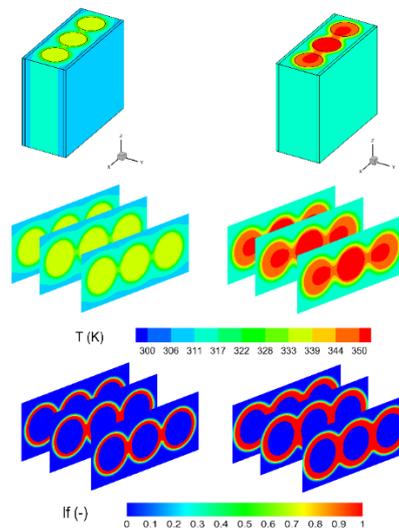
به منظور بررسی صحت و اعتبار فرض دوبعدی‌سازی در این مطالعه، و مطابق با پیشنهاد داور محترم، یک مورد از شبیه‌سازی‌های عددی به صورت سه‌بعدی نیز انجام شده است. در این مدل، باتری با نرخ تخلیه ۵C و با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص RT-44HC در شرایط بی‌وزنی (میکروگرویتی) مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی (شکل ۱۶ و شکل ۱۷) نشان می‌دهد که توزیع دما در راستای عمق باتری (بعد سوم) تفاوت معناداری با نتایج مدل دوبعدی ندارد. فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده نیز به صورت یکنواخت در عمق باتری رخ داده و تغییرات دما در راستای محور Z بسیار ناچیز بوده است. این نتایج تأیید می‌کند که در غیاب گرانش، جریان همرفت در راستای عمق شکل نمی‌گیرد و بنابراین انتقال حرارت عمدتاً در صفحات X-Y غالب است [۶۹].

این مشاهدات با یافته‌های مطالعات پیشین از جمله پژوهش‌های نجفی خوششان و همکاران [۷۰] و ژی و همکاران [۷۱]، نیز هم‌راستا است که در آن‌ها فرض دوبعدی‌سازی برای مسائل مشابه، به‌ویژه در شرایط بی‌وزنی، کاملاً معتبر دانسته شده است. علاوه بر این، مقاومت حرارتی بین لایه‌ها در راستای عمق بسیار ناچیز فرض شده و انتقال حرارت از بالا و پایین سیستم نیز به درستی قابل صرف نظر است. در مجموع، این بررسی صحت فرض دوبعدی‌سازی در مطالعه حاضر را تأیید کرده و استفاده از مدل دوبعدی را به عنوان گزینه‌ای با دقت مناسب و هزینه محاسباتی بسیار کمتر، توجیه‌پذیر می‌سازد.



شکل ۱۶: مقایسه حداکثر دمای پک باتری در شبیه سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی پک باتری



شکل ۱۷- کانتورهای توزیع دما و کسر حجمی ذوب شده از ماده تغییر فاز دهنده در مدل‌سازی سه‌بعدی پک باتری

۴- نتیجه‌گیری

چهار نوع پی‌سی‌ام مختلف شامل این-آیکوزان، آر‌تی-۳۵، آر‌تی ۴۴ سی، و تترادکانول برای پروفیل دشارژ ۵C مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورتیکه نصف زمان تخلیه مد نظر باشد، آر‌تی-۳۵ سی بهترین عملکرد را دارد. اما در صورتی که کل زمان تخلیه (۷۲۰ ثانیه) مدنظر باشد این پی‌سی‌ام حدوداً ۱۰ درجه دمای بیشتری را در پک باتری به وجود می‌آورد. در صورتیکه سه پی‌سی‌ام دیگر تقریباً دمای کاری مشابهی را در طول زمان تخلیه ایجاد می‌کنند. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که بیشتری مقدار دما در باتری میانی اتفاق می‌افتد که دلیل آن احاطه شده توسط دو باتری دیگر است. چهار نانوذره

مختلف شامل اکسیدهای برلیوم، زیرکانیم، سیلیکون و تیتانیوم مورد بررسی قرار داده شده‌اند. ملاحظه شد که به‌طور کلی تمامی نانوذرات تقریباً مشابه عمل می‌کردند. با این حال برلیوم اکسید عملکرد بهتری نسبت به سایرین در غلظت یک درصد را داشته است. به‌منظور مطالعه اثر کسر حجمی نانوذره بر عملکرد حرارتی پک باتری، چهار کسر حجمی ۱، ۳، ۵ و ۷ برلیوم اکسید در نرخ تخلیه ۵C مورد بررسی قرار داده شده است. ملاحظه شد که تقریباً به ازای هر درصد افزایش کسر حجمی نانوذره، دمای ماکزیمم باتری تقریباً یک درجه کاهش می‌یابد. نرخ‌های تخلیه ۱C، ۳C و ۵C نیز بر عملکرد حرارتی باتری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های تخلیه بالا، به‌ویژه ۵C، استفاده از کامپوزیت پی‌سی‌ام و نانوذرات اکسید برلیوم به‌طور مؤثری تجمع حرارت را کاهش داده و مدیریت حرارتی باتری را بهبود می‌بخشد. چهار چیدمان مختلف باتری بررسی شد و نتایج نشان داد که چیدمان شماره سه، با استفاده مؤثر از سطوح خارجی پک، بهترین عملکرد حرارتی را ارائه می‌دهد.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۶- فهرست علائم

A_{mushy}	پارامتر مربوط به منطقه خمیری [kg/m^3]
C_p	گرمای ویژه پی‌سی‌ام [$\text{kg}/(\text{J-K})$]
Da	عدد دارسی
g	شتاب گرانش [m/s^2]
H	آنتالپی کل [kJ/kg]
h	آنتالپی مخصوص [kJ/kg]
h_{sf}	گرمای نهان ذوب [kJ/kg]
k	رسانش گرمایی [W/m-K]
L	گرمای نهان ذوب [J/kg-K]
p	فشار [Pa]
t	زمان [s]
T	دما [K]

- Lithium Battery Pack Using Extended Kalman Filter, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 1, pp. 17-26, 2020.
- [8] M. J. Esfandyari, V. Esfahanian, M. Masih-Tehrani, and H. Nehzati, Design and Verification of a Model-less Approach for Maintaining Battery Safe Operation in Electric Vehicle Using Hardware-in-the-Loop Simulation, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME*, Vol. 20, No. 3, pp. 185-199, 2018.
- [9] A. B. Ansari, V. Esfahanian, and F. Torabi, Thermal-electrochemical simulation of lead-acid battery using reduced-order model based on proper orthogonal decomposition for real-time monitoring purposes, *Journal of Energy Storage*, Vol. 44, p. 103491, 2021.
- [10] G. Leita and B. Bozzini, Impact of space radiation on lithium-ion batteries: A review from a radiation electrochemistry perspective, *Journal of Energy Storage*, Vol. 100, p. 113406, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113406>.
- [11] T. Somsak, N. Sriyoaruean, M. Ngo-det, J. Thongpron, A. Namin, N. Patcharaprakiti, Study on Temperature Effects of Batteries Lithium Ion NCR18650GA Lifetime for Low Earth Orbit Satellites, in 2024 7th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 2024: IEEE, pp. 281-286, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/GTSD62346.2024.10675241>.
- [12] M. Eilenberger, H. Gunasekar, D. Gomez Toro, and C. Bänsch, Analysis of the thermal design of a COTS-based modular battery system for satellites by thermal vacuum testing, *CEAS Space Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 511-523, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12567-023-00526-8>.
- [13] H-R. Bahrami, M. Saberi, Numerical investigation of the use of solid or porous fins to improve heat transfer in an annular heat exchanger: Suitable thermal management of satellites, *erospace Knowledge and Technology Journal*, Vol. 13, No. 1, p. 33-48.
- [14] M. Morciano, M. Fasano, E. Chiavazzo, and L. Mongibello, Trending applications of phase change materials in sustainable thermal engineering: An up-to-date review, *Energy Conversion and Management: X*, p. 100862, 2025/01/02/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100862>.
- [15] B. R. Qawasmeh, M. Alrbai, and S. George, Cooling of lithium-ion battery

v حجم $[m^3]$

x,y مختصات [m]

β ضریب انبساط حرارتی [1/K]

ϵ تخلخل

ρ چگالی $[kg/m^3]$

λ کسر مایع

μ ویسکوزیته دینامیکی $[kg/(m.s)]$

زیرنویس

liquid مایع

f سیال

m ذوب

۷- مآخذ

- [1] R.A. Marsh, S. Vukson, S. Surampudi, B.V. Ratnakumar, M.C. Smart, M. Manzo, P.J. Dalton, Li ion batteries for aerospace applications, *Journal of power sources*, Vol. 97-98, pp. 25-27, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00584-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00584-5).
- [2] M. A. P. Mahmud, N. Huda, S. H. Farjana, and C. Lang, Comparative Life Cycle Environmental Impact Analysis of Lithium-Ion (LiIo) and Nickel-Metal Hydride (NiMH) Batteries, *Batteries*, Vol. 5, No. 1, p. 22, 2019, doi: 10.3390/batteries5010022.
- [3] M. C. Smart, B. V. Ratnakumar, R. C. Ewell, S. Surampudi, F. J. Puglia, and R. Gitzendanner, The use of lithium-ion batteries for JPL's Mars missions, *Electrochimica Acta*, Vol. 268, pp. 27-40, 2018/04/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.020>.
- [4] Y. Borthomieu and N. Thomas, Chapter 5 - Aerospace Applications. I. Satellites, Launchers, Aircraft, Elsevier, 2007, pp. 273-326.
- [5] A.A. Kebede, T. Coosemans, M. Messagie, T. Jemal, HA. Behabtu, J. Van Mierlo, M. Berecibar, Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application, *Journal of Energy Storage*, Vol. 40, p. 102748, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.
- [6] W. Walker, Rechargeable lithium batteries for aerospace applications, in *Rechargeable Lithium Batteries*: Elsevier, 2015, pp. 369-383.
- [7] M. Esfahanian, M. J. Esfandyari, V. Esfahanian, H. Nehzati, and H. Miladi, State of Charge Estimation for Series-Connected



- [22] E. Enayati, M. Siavashi, S. Mousavi, and A. Moaveni, Developing the optimal cooling strategy for battery thermal management systems under realistic driving conditions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 162, p. 108589, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108589>.
- [23] B. Li, L. Zhang, B. Shang, and Y. Huo, Numerical investigation on heat transfer characteristics in battery thermal management with phase change material composited by toroidal porous medium, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 154, p. 107414, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107414>.
- [24] W. Zhang, X. Li, W. Wu, and J. Huang, Influence of mechanical vibration on composite phase change material based thermal management system for lithium-ion battery, *Journal of Energy Storage*, Vol. 54, p. 105237, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105237>.
- [25] O. Yetik and T. H. Karakoc, A study on lithium-ion battery thermal management system with Al₂O₃ nanofluids, *International Journal of Energy Research*, Vol. 46, No. 8, pp. 10930-10941, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7893>.
- [26] A. Bais, D. Subhedar, and S. Panchal, Experimental investigations of a novel phase change material and nano enhanced phase change material based passive battery thermal management system for Li-ion battery discharged at a high C rate, *Journal of Energy Storage*, Vol. 103, p. 114395, 2024/12/10/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114395>.
- [27] M. G. Kibria, U. K. Paul, M. S. Mohtasim, B. K. Das, and N. Mustafi, Characterization, Optimization, and performance evaluation of PCM with Al₂O₃ and ZnO hybrid nanoparticles for photovoltaic thermal energy storage, *Energy and Built Environment*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.06.001>.
- [28] Y. Gao, A. Basem, S. Mohammad Sajadi, D. J. Jasim, N. Nasajpour-Esfahani, S. Salahshour, S. Esmaeili, Sh. Baghaei, The effect of initial pressure on the thermal behavior of the silica aerogel/PCM/CuO nanostructure inside a cylindrical duct using molecular dynamics simulation, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 54, p. 104064, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104064>.
- using PCM passive and semipassive thermal system immersed in nanofluid, *Energy Exploration & Exploitation*, p. 01445987241310003, 2024, doi: 10.1177/01445987241310003.
- [16] X. Li, L. Li, W. Hang, W. Wang, M. Yin, X. Wang, S. Bei, Q. Xu, J. Liu, K. Zheng, Systematic investigation of hybrid cold plate combining embedded phase change material with liquid cooling minichannels under different ambient temperatures for battery thermal management, *Journal of Energy Storage*, Vol. 108, p. 115125, 2025/02/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115125>.
- [17] Q. Su, F. Kang, J. Li, Q. Ma, Y. Wang, J. Duan, C. Zhang, Experimental and numerical investigation of a composite thermal management system for energy storage battery based on air cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 262, p. 125184, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125184>.
- [18] A. M. Elshaer, A. M. A. Soliman, M. Kassab, S. Mori, and A. A. Hawwash, Numerical study about thermal performance evaluation of PCM and PCM/fins composite-based thermal control module at microgravity conditions, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 20, p. 100419, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100419>.
- [19] N. Napa, M. K. Agrawal, and B. Tamma, Design of novel thermal management system for Li-ion battery module using metal matrix based passive cooling method, *Journal of Energy Storage*, Vol. 73, p. 109119, 2023/12/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109119>.
- [20] Z. Liu, C. Huadan, B. Wang, and P. Li, Coupling optimization of protruding fin and PCM in hybrid cooling system and cycle strategy matching for lithium-ion battery thermal management, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 207, p. 109372, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109372>.
- [21] K. Wang, Y. Li, B.-L. Wang, Z.-H. Rao, and C.-H. Min, Study on the integrated battery thermal management system based on magnetic fields and nano-enhanced phase change materials coupled with electrothermal films, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 240, p. 126665, 2025/05/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2025.126665>.



- [37] Y. Tauran, A. Brioude, A. Coleman, M. Rhimi, and B. Kim, Molecular recognition by gold, silver and copper nanoparticles, *World journal of biological chemistry*, Vol. 4, pp. 35-63, 08/26 2013, doi: 10.4331/wjbc.v4.i3.35.
- [38] D. V. Shtansky, A. T. Matveev, E. S. Permyakova, D. V. Leybo, A. S. Konopatsky, and P. B. Sorokin, Recent Progress in Fabrication and Application of BN Nanostructures and BN-Based Nanohybrids, *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 16, p. 2810, 2022.
- [39] F. Wang, C. Bai, L. Chen, and Y. Yu, Boron nitride nanocomposites for microwave absorption: A review, *Materials Today Nano*, Vol. 13, p. 100108, 2021/03/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2020.100108>.
- [40] G. P. Akishin et al., Thermal conductivity of beryllium oxide ceramic, *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 50, No. 6, pp. 465-468, 2009, doi: 10.1007/s11148-010-9239-z.
- [41] X.F. Wang, R.C. Wang, C.Q. Peng, T.T. Li, and B. Liu, Synthesis and sintering of beryllium oxide nanoparticles, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 20, pp. 81-86, 2010/11/01/ 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60011-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60011-2).
- [42] V. Altunal, BeO ceramics, in *Luminescent Ceramics: Elsevier*, 2025, pp. 159-178.
- [43] Z. Sattinova, B. Assilbekov, A. Pal, T. Bekenov, and B. B. Saha, Melting enhancement in vertical triplex-tube latent heat thermal energy storage system using BeO nanoparticles and internal fins, *Results in Engineering*, p. 103957, 2025/01/04/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103957>.
- [44] Y. Wang, T. Gao, L. Zhou, J. Gong, and J. Li, A parametric study of a hybrid battery thermal management system that couples PCM with wavy microchannel cold plate, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 219, p. 119625, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119625>.
- [45] P. Suthesh, J. Jose, T. K. Hotta, and B. Rohinikumar, Numerical investigations on thermal performance of PCM-based lithium-ion battery thermal management system equipped with advanced honeycomb structures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 158, p. 107937, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.107937>.
- [29] C. Zhao, Y. Tao, and Y. Yu, Thermal conductivity enhancement of phase change material with charged nanoparticle: a molecular dynamics simulation, *Energy*, Vol. 242, p. 123033, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104064>.
- [30] C. Ma, Y. Zhang, S. Hu, X. Liu, and S. He, A copper nanoparticle enhanced phase change material with high thermal conductivity and latent heat for battery thermal management, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 78, p. 104814, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104814>.
- [31] B. Kalidasan, A. Pandey, R. Saidur, and V. Tyagi, Energizing organic phase change materials using silver nanoparticles for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, Vol. 58, p. 106361, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106361>.
- [32] F. Wang et al., Thermal performance of a phase change material (PCM) microcapsules containing Au nanoparticles in a nanochannel: a molecular dynamics approach, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 373, p. 121128, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121128>.
- [33] S. Yin, M. Lu, C. Liu, L. Tong, L. Wang, and Y. Ding, Fabrication and thermal properties of capric-stearic acid eutectic/nano-SiO₂ phase change material with expanded graphite and CuO for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, Vol. 77, p. 110025, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110025>.
- [34] A. B. Al-Aasam, A. Ibrahim, K. Sopian, B. Abdulsahib, and M. Dayer, Nanofluid-based photovoltaic thermal solar collector with nanoparticle-enhanced phase change material (Nano-PCM) and twisted absorber tubes, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 49, p. 103299, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103299>.
- [35] G. Yang, B. Shang, B. Zhang, and E. Liang, Thermally-enhanced flexible phase change materials incorporating magnetically aligned boron nitride platelets for efficient thermal management, *Journal of Energy Storage*, Vol. 108, p. 115086, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115086>.
- [36] O. A. Alawi, N. A. C. Sidik, H. W. Xian, T. H. Kean, and S. N. Kazi, Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1314-1325, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.133>.





- [54] Y. Han, Y. Yang, T. Mallick, and C. Wen, Nanoparticles to enhance melting performance of phase change materials for thermal energy storage, *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 11, p. 1864, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12111864>.
- [55] A. Abderrahmane et al., Enhancing the melting process of shell-and-tube PCM thermal energy storage unit using modified tube design, *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 17, p. 3078, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12173078>.
- [56] A. Sciacovelli, F. Colella, and V. Verda, Melting of PCM in a thermal energy storage unit: Numerical investigation and effect of nanoparticle enhancement, *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, No. 13, pp. 1610-1623, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/er.2974>.
- [57] V. Selvaraj, B. Morri, L. M. Nair, and H. Krishnan, Experimental investigation on the thermophysical properties of beryllium oxide-based nanofluid and nano-enhanced phase change material, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 137, pp. 1527-1536, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35361-8>.
- [58] Z. Hu, S. Jiang, Z. Sun, and J. Li, Numerical simulation of fin arrangements on the melting process of PCM in a rectangular unit, *Renewable Energy*, Vol. 220, p. 119677, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119677>.
- [59] F. Afsharpanah, S. S. Mousavi Ajarostaghi, and M. Arıcı, Parametric study of phase change time reduction in a shell-and-tube ice storage system with anchor-type fin design, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 137, p. 106281, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106281>.
- [60] B. Buonomo, T. A. Famoso, M. R. Golia, O. Manca, S. Nardini, and R. E. Plomitallo, Numerical Analysis Comparing the Thermal Performance of Two Solar Chimneys Combined With Thermal Energy Storage Made of Phase Change Materials Embedded in a Metal Foam, in *Heat Transfer Summer Conference, 2024*, Vol. 87905: American Society of Mechanical Engineers, p. V001T01A017, doi: <http://dx.doi.org/10.1115/HT2024-131313>.
- [61] S. Yao, M. Zuo, and X. Huang, Evaluation and optimization of the thermal storage performance of a triplex-tube thermal energy storage system with V-shaped fins, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107937>.
- [46] R. Liu, W. Zhou, P. Shen, A. Prudil, and P. Chan, Fully coupled multiphysics modeling of enhanced thermal conductivity UO₂-BeO fuel performance in a light water reactor, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 295, pp. 511-523, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2015-52504>.
- [47] V. Bobkov, L. Fokin, E. Petrov, V. Popov, V. Rumiantsev, and A. Savvatimsky, Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data, IAEA, Vienna, pp. 18-21, 2008.
- [48] M. McQuarrie, Thermal conductivity: VII, analysis of variation of conductivity with temperature for Al₂O₃, BeO, and MgO, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 37, No. 2, pp. 91-95, 1954, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.1954.tb20106.x>.
- [49] M. Jafaryar and M. Sheikholeslami, Simulation of melting paraffin with graphene nanoparticles within a solar thermal energy storage system, *Scientific Reports*, Vol. 13, 05/26 2023, doi: [10.1038/s41598-023-35361-8](https://doi.org/10.1038/s41598-023-35361-8).
- [50] A. V. Arasu and A. S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 8-16, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.09.013>.
- [51] M. Abolghasemi, A. Keshavarz, and M. A. Mehrabian, Thermodynamic analysis of a thermal storage unit under the influence of nano-particles added to the phase change material and/or the working fluid, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1961-1970, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-012-1039-1>.
- [52] T. L. Wong, Y. S. Perera, C. Vallés, A. Nasser, and C. Abeykoon, A data-driven model on the thermal transfer mechanism of composite phase change materials, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 50, p. 102486, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102486>.
- [53] M. A. Amidu, M. Ali, A. K. Alkaabi, and Y. Addad, A critical assessment of nanoparticles enhanced phase change materials (NePCMs) for latent heat energy storage applications, *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, p. 7829, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34907-0>.

environments, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 244, p. 122777, 2024.

[70] H. N. Khaboshan et al., Thermal uniformity analysis of a hybrid battery pack using integrated phase change material, metal foam, and counterflow minichannels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 259, p. 124910, 2025.

[71] L. Xie, Y. Huang, and H. Lai, Coupled prediction model of liquid-cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion module, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 178, p. 115599, 2020.

۸- پی نوشت

1. Li-Ion
2. NiCad
3. PbSO4
4. Thermal Runaway
5. Al₂O₃
6. ZnO
7. CuO
8. SiO₂
9. SiC
10. BN
11. BEO

Journal of Thermal Science, Vol. 32, No. 6, pp. 2048-2064, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1795-x>.

[62] A. Kumar and A. Maurya, Transient Analysis of Phase Change Material-Based Triple-Tube Unit with Sinusoidal Wavy-Shaped Fin, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 49, No. 8, pp. 10867-10889, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08525-x>.

[63] N. B. Khedher et al., Accelerated melting dynamics in latent-heat storage systems via longitudinal and circular fins: A comprehensive 3D analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 156, p. 107602, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107602>.

[64] X. Yang, X. Wang, Z. Liu, X. Luo, and J. Yan, Effect of fin number on the melting phase change in a horizontal finned shell-and-tube thermal energy storage unit, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 236, p. 111527, 2022.

[65] Z. N. Meng and P. Zhang, Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM, *Applied Energy*, Vol. 190, pp. 524-539, 2017/03/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.163>.

[66] Q. Mao and Y. Zhang, Thermal energy storage performance of a three-PCM cascade tank in a high-temperature packed bed system, *Renewable Energy*, Vol. 152, pp. 110-119, 2020/06/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.051>.

[67] M.-J. Li, M.-J. Li, Z.-X. Tong, and D. Li, Optimization of the packed-bed thermal energy storage with cascaded PCM capsules under the constraint of outlet threshold temperature, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 186, p. 116473, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116473>.

[68] N. B. Khedher et al., Maximizing charging/discharging capabilities of horizontal shell-and-tube latent heat storage systems with innovative curved fin inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 236, p. 126289, 2025/01/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126289>.

[69] C. Wu et al., Numerical study and optimization of battery thermal management systems (BTMS) Based on Fin-Phase change material (PCM) in variable gravity

