



بررسی عددی انتقال حرارت از یک بلوک باتری با سازه‌های ساختار مکعبی مرکز سطحی و مرکز حجمی پر شده از مواد تغییر فاز دهنده

رسول علیزاده^۱، سوسن خسرویاری^{۲*}، سمانه داودی راد^۳

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، قوچان، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، قوچان، ایران

۳. استادیار، دانشکده ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، قوچان، ایران

*نویسنده مسئول: susankhosroyar@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

چکیده

محیط زیست و منابع انرژی تجدید ناپذیر، پژوهشگران را بر آن داشته تا با تبیین شیوه‌های نوین، راهکارهایی به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی در حوزه‌های گوناگون ارائه دهند. یکی از مواردی که این روزها بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در حوزه باتری‌ها است. در طرح حاضر بنا است تا تاثیر استفاده از این مواد در بررسی انتقال حرارت از یک بلوک باتری با ساختارهای مکعبی مرکز سطحی^۱ و مرکز حجمی^۲ بررسی گردد. این پژوهش در سه حالت بررسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت اول میزان انتقال حرارت یک بلوک باتری بدون مواد تغییر فاز دهنده، حالت دوم میزان انتقال حرارت با مواد تغییر فاز دهنده با ساختار شبکه مکعب مرکز حجمی و حالت سوم میزان انتقال حرارت باتری با مواد تغییر فاز دهنده و ساختار شبکه مکعبی مرکز سطحی. این پژوهش با کمک نرم‌افزار آنسیس انجام گرفته است و نتیجه این پژوهش بیانگر این است که کمترین میزان انتقال حرارت در موقع استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با ساختار مکعبی مرکز سطحی می‌باشد و این ساختار شبکه باعث کاهش چشمگیر میزان مصرف انرژی می‌گردد.

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت، باتری، حل عددی.

مقدمه

توسعه دستگاه‌های ذخیره انرژی کارآمد و ارزان به اندازه توسعه منابع انرژی مهم است. ذخیره انرژی حرارتی ذخیره موقت گرما در دماهای بالا و پایین است. ذخیره انرژی حرارتی مفهوم جدیدی نیست و قرن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع، ذخیره انرژی می‌تواند عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی را کاهش دهد و نقش مهمی در حفظ انرژی و عمر دارد. ذخیره انرژی با کنترل میزان عرضه، پایداری سیستم‌های قدرت را بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث می‌گردد که آنها کارآمدتر کار کنند. برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر به طور مداوم و متناوب انرژی تولید می‌کنند. اگرچه خورشید منبع انرژی ایمن، پاک و فراوان است، اما این انرژی فقط در زمان‌های خاصی از سال و در روزهای خاصی در دسترس است.

محمدي [۱] در پژوهشی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ترکیب سیستم‌های سرمایه‌گذاری تراکمی و سرمایه‌گذاری آزاد را نشان داد که هدف از این پژوهش تحلیل انرژی و انرژی ترکیب دو سیستم سرمایه‌گذاری آزاد و سرمایه‌گذاری تراکمی است که در آن‌ها از مواد تغییر فاز دهنده به منظور صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم، استفاده شده است. ماده تغییر فاز دهنده دما متوسط بکار رفته در سیستم سرمایه‌گذاری آزاد در طول شب با هوای محیط شارژ می‌شود و در طول روز و در طی فرآیند تخلیه، با خنک کردن هوای ورودی به کندانسور سیستم تراکمی، سبب کاهش مصرف انرژی در سیستم خنک کننده ساختمان می‌گردد. از سوی دیگر، تخلیه انرژی حرارتی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده در طول

¹ Surface center cubic (FCC)

² Volume center cubic (BCC)



ساعات اوج مصرف صورت می‌گیرد. در این ساعات هزینه انرژی بالاتر است و بنابراین با استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌توان در هزینه‌های انرژی الکتریکی یک ساختمان نیز صرفه‌جویی نمود. بررسی فنی و اقتصادی این سیستم ترکیبی، نشان می‌دهد که ۴/۸۵٪ کاهش مصرف انرژی الکتریکی، ۱۴/۷۶٪ کاهش در ساعات اوج مصرف و ۶/۷۱٪ کاهش در قبض برق قابل انتظار است. فرج‌الهی و همکاران [۲] در پژوهشی ارایه و تحلیل عددی عملکرد مدیریت سیستم حرارتی خنک کننده در باتری لیتیوم یونی را نشان دادند که عامل اساسی خرابی و کاهش چشمگیر عملکرد باتری بالا رفتن دمای آن است، در نتیجه سیستم‌های کنترل حرارتی باتری برای نظارت و بهینه سازی وضعیت حرارتی باتری‌ها ساخته شده‌اند. نتایج نشان داد حداکثر اختلاف دما در چینش سری بسته باتری‌ها اختلافی ۱۰ درصدی با چینش موازی دارد، همچنین با مقایسه شار حرارتی کل، عملکرد بهتر چینش موازی در مقایسه با چینش سری باتری‌ها، این نوع طراحی را به اولویتی کاربردی و مقرون بصرفه‌تر نسبت به دیگر طرح پیشنهادی قرار می‌دهد. طالب زادگان و همکاران [۳] در پژوهشی اثر نسبت منظری بر فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده غیرنیوتنی کارئو در فضای متخلخل بین دو لوله عمودی را بررسی کردند. در پژوهش آنها، انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در فرآیند ذوب یک ماده تغییر فازدهنده غیرنیوتنی کارئو در فضای بین دو استوانه عمودی هم مرکز در حضور محیط متخلخل، با روش آنالپی تخلخل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت منظری از ۰/۵ تا ۲ عدد ناسلت و سرعت افزایش ولی سرعت ذوب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد استفان و کاهش پارامتر تخلخل، سرعت ذوب افزایش می‌یابد. بعلاوه در محیط متخلخل تغییر شاخص کارئو تأثیری بر روی نرخ فرآیند ذوب ندارد. میراخورلو و همکاران [۴] در پژوهشی بررسی تجربی خنک‌کاری صفحات فتوولتائیک با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در زوایای مختلف را بررسی کردند. زمانی که دمای محیط و شدت تابش نور بر این صفحات افزایش می‌یابد، دمای کاری این صفحات نیز به طور خطی افزایش می‌یابد. مقایسه پارامترهای بازدهی الکتریکی و توان خروجی صفحات فتوولتائیک بهبود قابل توجهی در کارایی این صفحات را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که به طور میانگین در حالت اول ۱۱/۸۳٪ و در حالت دوم ۱۱/۴٪ افزایش بازدهی مشاهده شده است. همتی و همکاران [۵] در پژوهشی بررسی تجربی سیستم مدیریت حرارتی منبع تغذیه با استفاده از مواد تغییر فازدهنده را انجام دادند. در این پژوهش، مدیریت حرارتی یک منبع تغذیه رایانه با استفاده از مواد تغییر فازدهنده به منظور افزایش عمر دستگاه، بهبود عملکرد و همچنین کاهش مصرف انرژی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر عملکرد بهتر چشمه گرمایی نوع صفحه-پره نسبت به نوع پره سوزنی در روند کاهش دما و هزینه است. حکمت و مولایی منش [۶] در پژوهشی بررسی تجربی عملکرد یک سیستم مدیریت حرارتی هیبرید آب-خنک و ماده تغییر فازدهنده در یک ماژول باتری لیتیومی مورد استفاده در یک خودروی الکتریکی را انجام دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، دمای باتری بدون سیستم خنک‌کاری در دشارژ بالا به مرز ۵۷ درجه سانتی‌گراد رسیده است و در حالت دوم آزمایش که توسط مواد تغییر فاز دهنده انجام گرفته، دمای سلول‌ها کاهش چشمگیری داشته و نسبت به حالت اول آزمایش، ۲۶ درجه سانتی‌گراد دمای باتری‌ها کاهش یافته و به ۳۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در حالت سوم آزمایش، خنک‌کاری به صورت هیبرید توسط مواد تغییر فاز دهنده و لوله‌های آب-خنک صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که دمای میانگین باتری‌ها با ۱/۵ درجه کاهش، به دمای بهینه ۳۰/۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. عزیزی [۷] در پژوهشی مروری بر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در کنترل دمایی انواع باتری را انجام و نشان دادند، یکی از مهم‌ترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده است. موادی که در مواقع لزوم تغییر فاز می‌دهند، انرژی را در شکل‌های مختلف در خود ذخیره کرده و در مواقع لزوم آزاد می‌کنند. این مواد با اثراتی مانند افزایش ضریب انتقال حرارت، افزایش ظرفیت گرمایی، پایداری حرارتی و شیمیایی موجب ذخیره‌سازی انرژی حرارتی می‌شوند. نتایج حاصل از مدیریت گرمایی باتری با مواد تغییر فاز دهنده مطلوب‌تر از به کار بردن مایعات یا هوا به عنوان سردساز است. وانگ و همکاران [۸] در پژوهشی تأثیر تخمین دمای یوتکتیک سرب-بیس‌موت مایع بر عملکرد و رفتارهای مکانیکی مخزن ذخیره گرمای محسوس را بررسی و نشان دادند که سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت محسوس ترموکلاين معمولاً در سیستم‌های انرژی خورشیدی سهموی استفاده می‌شوند. نتایج نشان دهنده این بود که عملکرد ذخیره‌سازی گرما و همچنین رفتار انتشار حرارت مخزن را می‌توان با افزایش دمای اولیه سرد یا با کاهش دمای اولیه گرم بهبود. ریاحی و همکاران [۹] در پژوهشی ارزیابی تحویل



اگرزری سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای نیروگاه‌ها نمودند. نتایج تجزیه و تحلیل انرژی و اگرزری برای مقایسه بازده کلی اگرزری برای تحویل کار مفید ۶۸۰ مگاوات ساعت به بلوک قدرت استفاده شد. این نتایج پتانسیل بالای سیستم‌های غیرمستقیم آبشاری تغییر فاز دهنده یا گرافیت- تغییر فاز دهنده را برای تامین انرژی حرارتی مورد نیاز بلوک قدرت با راندمان اگرزری قابل مقایسه با سیستم دو مخزن نشان می‌دهد. احمد و همکاران [۱۰] تجزیه و تحلیل عملکرد حرارتی ترموکلاین ترکیبی از سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان محسوس با استفاده از طرح‌های تغییر فاز دهنده لایه‌ای آبشاری برای کاربردهای دمای متوسط را مطالعه و نشان دادند که استفاده از تغییر فاز دهنده‌های چند مرحله‌ای با ترکیب مناسب ضخامت لایه و دمای همجوشی همراه با گنجاندن مواد پرکننده ساختار یافته ارزان‌تر، یک جایگزین کارآمد و مقرون به صرفه را ارائه می‌دهد. وو و همکاران [۱۱] در پژوهشی بررسی افزایش هدایت حرارتی در مواد تغییر فاز برای ذخیره انرژی حرارتی را انجام دادند. هدف این بررسی ارائه بینشی در مورد مکانیسم هدایت حرارتی فونون‌ها در تغییر فاز دهنده و مورفولوژی، روش آماده سازی و همچنین هدایت حرارتی تغییر فاز دهنده مرکب است. مطالعات تحقیق نشان می‌دهد که چالش‌های بهبود رسانایی حرارتی تغییر فاز دهنده بر جنبه های شفاف سازی مکانیسم پراکندگی فونون در تغییر فاز دهنده، افزایش تعداد زنجیره‌های هدایت حرارتی و گسترش کانال‌های انتقال حرارتی تمرکز دارد. رستمی و همکاران [۱۲] در پژوهشی مروری بر فرآیندهای ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آنها در ذخیره‌سازی انرژی را انجام دادند و نشان دادند تغییر فاز (تغییر فاز دهنده) قادر به ذخیره انرژی به عنوان انرژی نهفته با تغییر فاز هستند و انرژی ذخیره شده را وقتی که در زمان مورد نظر به فاز اولیه خود باز می‌گردند، تامین می‌کنند. سینگ و همکاران [۱۳] در پژوهشی پتانسیل تغییر فاز دهنده ماکرو کپسوله شده برای ذخیره انرژی حرارتی در ساختمان‌ها را انجام داده و نشان دادند، بخش ساختمان به عنوان یکی از مصرف کنندگان اصلی انرژی که منجر به انتشار کربن بالا می‌شود، تکامل یافته است. ذخیره انرژی حرارتی همراه با تغییر فاز دهنده روشی برای بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها است. سون و همکاران [۱۴] در پژوهش خود به بررسی پوشش سبک ساختمان با دیوار حاوی مواد تغییر فاز دهنده در تابستان پرداختند. این یکی از مطالعات نادری است که امکان تجزیه و تحلیل تفاضلی دیوارهای با و بدون مواد تغییر فاز دهنده را تحت تاثیرات حرارتی و تشعشعی کنترل شده فراهم می‌کند. در این پژوهش مشاهده گردید که گنجاندن تخته دیواری مواد تغییر فاز دهنده نوسانات دمای هوا در اتاق را کاهش می‌دهد و مشاهده می‌شود که اثر گرمای بیش از حد با مواد تغییر فاز دهنده کمتر است. لیانگ و همکاران [۱۵] نیز نتایج پژوهش خود را اینگونه بیان کردند که به دلیل وجود رباط‌های متقاطع شبکه مکعبی مرکز سطحی، سیال بیشتری به سمت ناحیه انتهایی جریان می‌یابد و شتاب و کاهش دوره‌ای سیال در گذر جریان آزاد رخ می‌دهد که باعث افزایش تناوب انتقال حرارت می‌شود. میانگین افزایش انتقال حرارت تولید شده توسط شبکه های مکعبی مرکز سطحی حداقل ۳ برابر بیشتر از یک کانال صاف است. اندازه رباط های آنها در جهت جریان، با در نظر گرفتن مبادله بین انتقال حرارت و افت فشار، شبکه مکعبی مرکز سطحی دایره ای بالاترین راندمان انتقال حرارت را نشان می‌دهد.

نحوه انجام مدیریت حرارتی باتری به طور موثر، می‌تواند اطمینان حاصل کند که بسته باتری به طور پایدار کار می‌کند و عمر دایره باتری را بهبود می‌بخشد، در حال تبدیل شدن به یک موضوع مهم در توسعه وسایل نقلیه الکتریکی است. (تغییر فاز دهنده) به عنوان یک پارامتر کلیدی موثر بر عملکرد اتلاف حرارت سیستم باتری، هدایت حرارتی مواد تغییر فاز به طور فعال مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی انتقال حرارت از یک بلوک باطری با ساختارهای مکعبی مرکز سطحی و مرکز حجمی پر شده از تغییر فاز دهنده پرداخته می‌شود. در این پژوهش مطرح می‌باشد که تغییر فاز دهنده چه تاثیری بر انتقال حرارت در باطری‌های با ساختار مکعبی مرکز سطحی و مرکز حجمی دارد.

بیان مسئله و معادلات حاکم

در این تحقیق، مطابق شکل (۱) از طرح باطری ۶ در ۶ با ابعاد و اندازه های تجاری موجود در بازار استفاده شده است. در ابتدا یک باطری بدون مواد تغییر فاز دهنده و سپس همان باطری با مواد تغییر فاز دهنده و ساختار شبکه مرکز حجمی و نهایتاً همان باطری با ساختار شبکه مرکز سطحی مدل سازی گردیده و در هریک از سه حالت ذکر شده به بررسی میزان انتقال حرارت و سرعت خنک شوندگی آنها پرداخته شده است. این مدل سازی توسط نرم افزار آنسیس صورت گرفته است. برای باطری با



ساختار شبکه از مقدار مقاومت ما بین لایه‌های مختلف صرف‌نظر می‌شود. برای محاسبه تاثیر گرمای نهان مدل مواد تغییر فاز دهنده در برنامه پیش فرض می‌گردد. در این پژوهش هدف انتقال گرما در دیوارهای شبکه می‌باشد. معادلات موسوم به RATS در انتقال گرمایی دیوار چند لایه به روش انتقال تک بعدی بررسی شد.

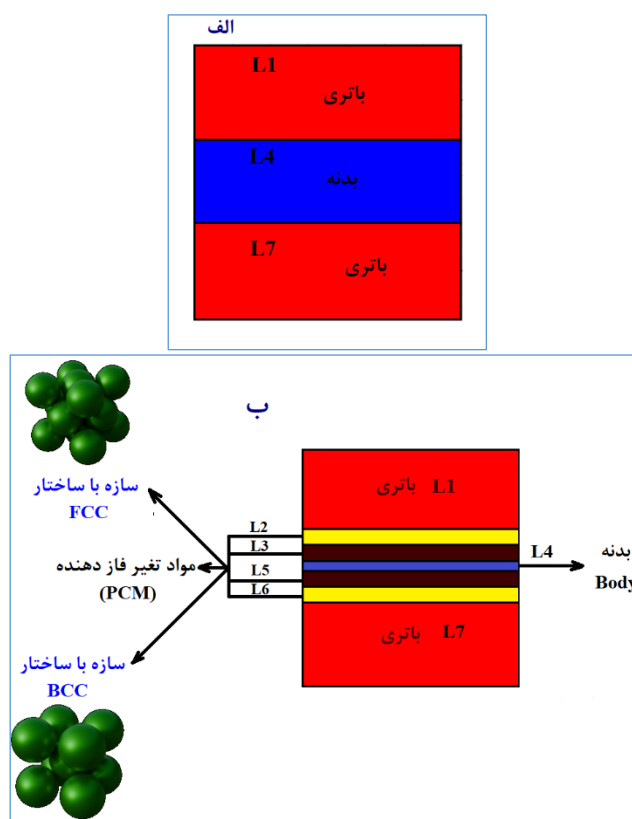
$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

رابطه (۲) مدلی برای مواد تغییر فاز دهنده را با استفاده از معادله مرجع غیر خطی در معادلات حاکم نشان می‌دهد.

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - L \rho_{pcm} \frac{\partial g_1}{\partial x} \quad (2)$$

که در این معادله، ρ_{pcm} چگالی ماده تغییر فاز دهنده، g_1 مقدار جزیی فاز مایع می باشد. تغییر فاز از حالت جامد به مایع در یک محدوده دمایی رخ می‌دهد و مقدار مواد تغییر فاز دهنده در هر فاز یک تابعی از دما خواهد بود که معادلات آن به ترتیب زیر می‌باشد:

$$g_1 = F(T) \quad , \quad 0 \leq g_1 \leq 1 \quad , \quad g_1 = \begin{cases} 1 & \text{مایع} \\ 0 & \text{جامد} \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۱: فیزیک مورد مطالعه الف) باتری بدون مواد تغییر فاز دهنده. ب) باتری با مواد تغییر فاز دهنده همراه استفاده از سازه با ساختار مرکز حجمی و ساختار مکعبی مرکز سطحی.

در معادلات بالا تابع F نمایش دهنده شکلی است که به وسیله رابطه (۱) پدید آمده است که در شکل (۱) نشان داده است [۱۶]. برای دیوار مرکب حاوی مواد تغییر فاز دهنده خواص مواد یعنی ρ جزو خصوصیات میانگین در نظر گرفته می‌شود که از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند.



$$\rho_c = (1 - W_{pcm})\rho_{batt} + W_{pcm}(\rho_{pcm1g1} + \rho_{pcms}(1 - g_1)) \quad (۴)$$

$$C_{pc} = (1 - W_{pcm})c_{batt} + W_{pcm}(C_{pcm1g1} + C_{pcms}(1 - g_1)) \quad (۵)$$

که در آن W_{pcm} مقدار جرمی ماده تغییر فاز دهنده، در لایه مرکب باطری است. رسانایی گرمایی دیوار مرکب مواد تغییر فاز دهنده توسط معادله ماکسول در فاز جامد پیوسته بدست می‌آید.

$$K_C = K_{batt} \left(1 + \frac{3\varphi}{\left(\frac{K_{pcm} + 2K_{batt}}{K_{pcm} - K_{batt}} \right) - \varphi} \right) \quad (۶)$$

که در آن K_{pcm} رسانایی گرمایی ماده تغییر فاز دهنده است. عملیات‌های خاصی برای تداخل بین قسمت‌های تغییر فاز دهنده و غیر تغییر فاز دهنده در دیوار شبکه مورد نیاز است. اگر ماده تغییر فاز دهنده در لایه دوم وارد تغییر فاز شود، پس تعادل انرژی در نقطه درگیری برابر است با:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1 Layer_1} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_2 Layer_2} \quad (۷)$$

زمانی که تغییر فاز رخ می‌دهد تعادل انرژی به صورت رابطه (۸) در می‌آید.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1 Layer_1} = L\rho_{pcm} \frac{\partial g_1}{\partial t} - k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1 Layer_2} \quad (۸)$$

سطح داخلی در $X=X_3$ در هر دو مورد تابش و جابه‌جایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

حل عددی معادلات حاکم

نرم افزار انسیس برای حل معادله انتقال گرمای دیوارهای باتری شبکه از دو روش توابع انتقال گرمایی و روش تفاضل محدود استفاده می‌کند. روش اول در حالت‌هایی که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمی‌گردد، بهره گرفته می‌شود ولی در حالت‌هایی که در باتری از مواد تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود، روش دوم جوابگو خواهد بود. در این پژوهش به دلیل استفاده از باتری شبکه حاوی مواد تغییر فاز دهنده، از روش دوم استفاده می‌گردد. مدل‌های این نرم افزار تقریباً در همه جنبه‌های خود برنامه از اصول تعادل گرمایی پیروی می‌کند. وقتی تحلیل‌های انرژی به سمت مدل سازی‌های پیشرفته سازه‌ها مانند مواد تغییر فاز دهنده می‌رود بایستی از روش‌های اساسی حل، به سمت روش‌های دیگری که قابلیت حل مسایل را داشته باشد حرکت نمود. بنابراین روش تفاضل محدود رسانایی و الگوریتم حل به روش تفاضل محدود در انسیس ایجاد شده است. این روش جایگزین روش حل توابع رسانایی گرمایی نشده است اما برای مواردی که کاربران مواد تغییر فاز دهنده یا مواد با ضریب رسانایی متغیر را شبیه سازی می‌کنند کارا می‌باشد در اینجا از روش معادله دیفرانسیلی ضمنی همراه با تابع آنتالپی دما برای محاسبه مواد تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود. رابطه ضمنی برای گره‌های داخلی در زیر نشان داده شده است.

$$C_p \Delta \rho_x \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta t} = \left(\frac{1}{2} \right) \left[\left(K_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + K_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) + \left(K_w \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + K_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \right] \quad (۹)$$

$$h_i = HTF(T_i) \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) HTF تابع دما-آنتالپی می‌باشد که اطلاعات آن باید توسط کاربر وارد نرم افزار شود (با انتخاب نوع ماده تغییر فاز دهنده). چون روش حل به صورت ضمنی می‌باشد روش گاوس-سیدل برای بروز رسانی دماهای گره‌های جدید در سازه‌ها برای بهبود پایداری بیشتر معادله به کار گرفته می‌شود. حلقه تکرار گاوس-سیدل یک حل کننده داخل حلقه ای



می‌باشد و برای هر سطح، تشکیل حلقه لازم است. این حلقه معمولاً به ۹۱ تکرار محدود می‌شود و بعد از سی تکرار جواب را ارایه می‌نماید. اما زمانی که مجموع گره‌های دمایی بین آخرین خواسته و خواسته کنونی تغییر می‌کند با نرمالیزه کردن بوسیله جمع مقادیر دما ها که کمتر از 0.00001 می‌باشد، زودتر حاصل می‌گردد. این شعاع هم‌گرایی به صورت معمول پس از سه تکرار به دست می‌آید ولی به استثنای مواد تغییر فاز دهنده که وقتی شبیه سازی آن‌ها صورت می‌گیرد دو یا سه تکرار بیشتر می‌طلبد. در مواقعی که مواد تغییر فاز دهنده، تغییر فاز می‌دهند اگر تعداد تکرار برای رسیدن به مقدار شعاع هم‌گرایی مورد نیاز افزایش یابد یک فاکتور داخلی به صورت اتوماتیک وارد شده و در بسیاری از موارد تعداد تکرار را به کمتر از ۱۰ می‌رساند.

نتایج و بحث

برای تحلیل و بررسی میزان تاثیر حالت‌ها و مواد تغییر فازدهنده مختلف در باطری هدف ابتدا فضای نمونه تعریف می‌گردد. بدین منظور یک مجموعه باطری انتخاب شده است و نتایج در نرم افزار اخذ شده است. به منظور بررسی و پژوهش در این طرح در ابتدا یک مجموعه باطری بدون مواد تغییر فازدهنده و سپس همان مجموعه باطری با مواد تغییر فاز دهنده و ساختار شبکه مکعبی مرکز حجمی و نهایتاً همان مجموعه باطری با ساختار شبکه مکعبی مرکز سطحی مدل سازی گردیده و در هریک از سه حالت ذکر شده به بررسی میزان انتقال حرارت و سرعت خنک شوندگی آنها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که مسئله در حالت پایدار حل شده است. شرایط مرزی مسئله به این صورت است که آب خنک کننده در دمای $298/15$ درجه کلوین و با سرعت 0.1 متر بر ثانیه وارد قسمت مخصوص به سیال می‌شود، شرط خروجی هم فشار بوده و دمای ثابت باطری در حل $313/15$ در نظر گرفته شده است. همچنین در پژوهش حاضر از مواد RT-35HC، سدیم و منیزیم به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. دما در لایه های مختلف شکل (۱) در جداول (۱) الی (۳) نشان داده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش سون و همکاران [۱۴]، لیانگ و همکاران [۱۵] و عزیزی [۷] در یک راستا می‌باشد.

جدول ۱: دما در نقاط مختلف لایه های بلوک باتری در حالت عدم وجود مواد تغییر فاز دهنده

لایه	دما (درجه کلوین)
L1	۳۱۳/۱۵
L4	۳۱۳/۰۰
L7	۳۱۳/۱۵

جدول ۳: دما در نقاط مختلف لایه های بلوک باتری در حالت سازه با مکعبی مرکز سطحی و مواد تغییر فاز دهنده مختلف

لایه	RT35HC (FCC)	Sodium (FCC)	Magnesium (FCC)
L1	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵
L2	۳۰۹/۳۷	۳۰۹/۳	۳۱۰/۱۱
L3	۳۰۴/۰۹	۳۰۴/۸۱	۳۰۴/۰۳
L4	۳۰۰/۳۱	۳۰۲/۵۴	۳۰۳/۲۷
L5	۳۰۴/۰۹	۳۰۴/۸۱	۳۰۴/۰۳
L6	۳۰۹/۳۷	۳۰۹/۳	۳۱۰/۱۱
L7	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵

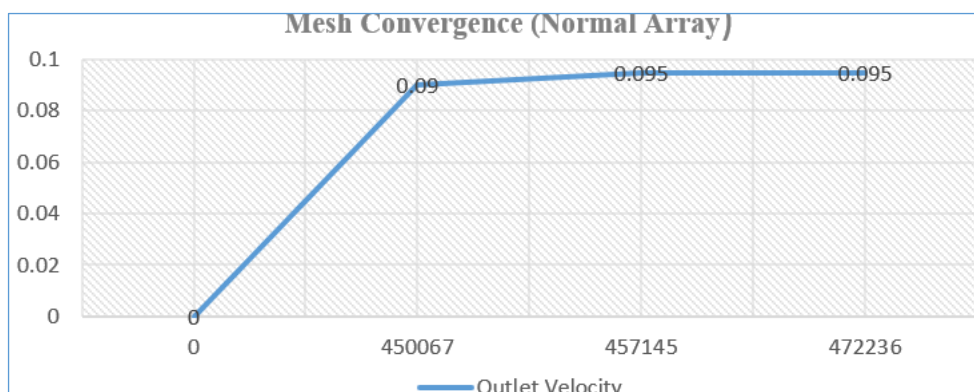
جدول ۲: دما در نقاط مختلف لایه های بلوک باتری در حالت سازه مکعبی مرکز حجمی و مواد تغییر فاز دهنده مختلف

لایه	RT35HC (BCC)	Sodium (BCC)	Magnesium (BCC)
L1	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵
L2	۳۱۰/۱۳	۳۱۰/۸۷	۳۱۰/۸۷
L3	۳۰۹/۳۷	۳۱۰/۱۱	۳۰۶/۳
L4	۳۰۱/۸۲	۳۰۳/۵۸	۳۰۴/۷۸
L5	۳۰۹/۳۷	۳۱۰/۱۱	۳۰۶/۳
L6	۳۱۰/۱۳	۳۱۰/۸۷	۳۱۰/۸۷
L7	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵	۳۱۳/۱۵



نتایج حالت اول

در این حالت با توجه به اینکه هیچگونه ماده تغییر فاز دهنده در طرح در نظر گرفته نشده است، نمودار میزان سرعت خروجی و میزان همگرایی شبکه در شکل (۲) نمایش داده شده است. میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت نیز در جدول (۴) قرار داده شده است.



شکل ۲: میزان همگرایی شبکه در چیدمان نرمال

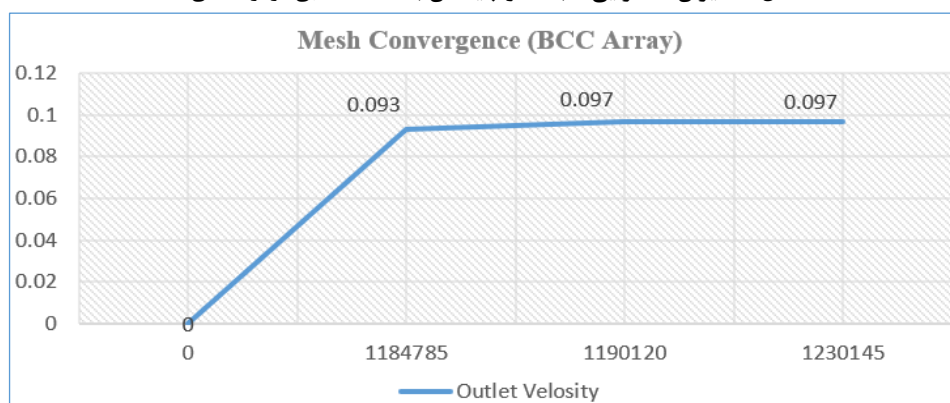
جدول ۴: میزان میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در چیدمان نرمال

نتایج	نرخ انتقال حرارت روی سیال خنک کاری	شار حرارتی بدنه
Water-RT35HC	۲۵۲/۳۴	۳۷/۸۴
Water-Sodium acetate	۳۹۶/۸۱	۵۸/۹
Water-Magnesium nitrate	۴۷۹/۳۵	۷۰
Air-RT35HC	۱۰/۶۷	۱/۶۸
Air-Sodium acetate	۱۰/۸۴	۱/۶۸
Air-Magnesium nitrate	۱۰/۸	۱/۶۸

نتایج حالت دوم

در این حالت مجموعه باطری با چیدمان ساختار شبکه مکعبی مرکز حجمی در نظر گرفته شده است، نمودار میزان سرعت خروجی و میزان همگرایی شبکه در شکل (۳) نمایش داده شده است. میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت نیز در جدول (۵) قرار داده شده است.

شکل ۳: میزان همگرایی شبکه در چیدمان با حالت مکعبی مرکز حجمی



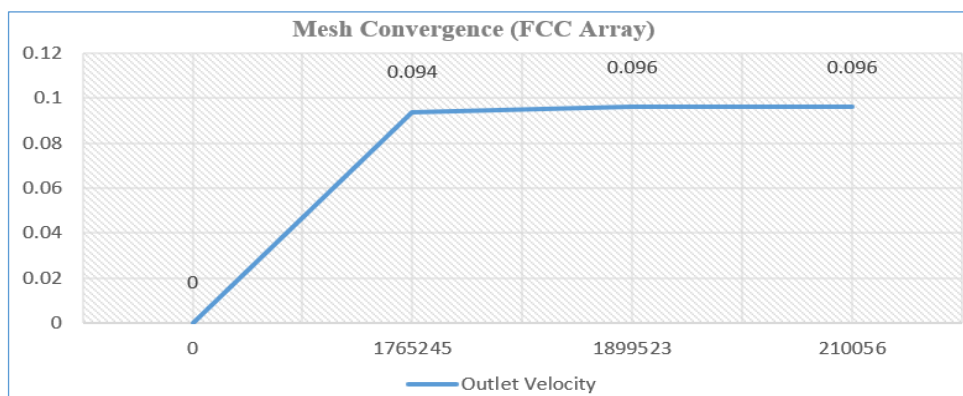


جدول ۵: میزان میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در چیدمان با حالت مکعبی مرکز حجمی

شار حرارتی بدنه	نرخ انتقال حرارت روی سیال خنک کاری	نتایج
۳۲/۴۳	۲۱۵/۹۳	Water-RT35HC(BCC)
۵۱/۳۵	۳۴۴/۴۳	(BCC) Water-Sodium acetate
۶۲/۶۴	۴۲۳	(BCC) Water-Magnesium nitrate
۱/۶۷	۱۰/۵۹	Air-RT35HC(BCC)
۱/۶۸	۱۰/۷۸	Air-Sodium acetate(BCC)
۱/۶۸	۱/۷۶	Air-Magnesium nitrate(BCC)

نتایج حالت سوم

در این حالت مجموعه باطری با چیدمان ساختار شبکه مکعبی مرکز سطحی در نظر گرفته شده است، نمودار میزان سرعت خروجی و میزان همگرایی شبکه در شکل (۴) نشان داده شده است. میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت نیز در جدول (۶) قرار داده شده است.



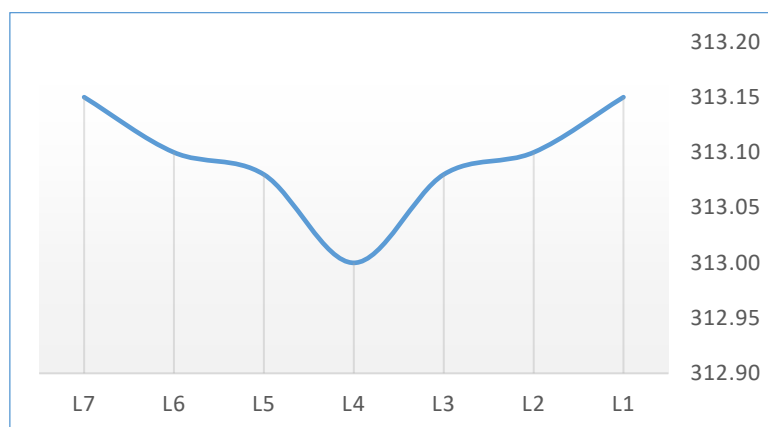
شکل ۴: میزان همگرایی شبکه در چیدمان با حالت ساختار مکعبی مرکز سطحی

جدول ۶: میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در چیدمان با حالت ساختار مکعبی مرکز سطحی

شار حرارتی بدنه	نرخ انتقال حرارت روی سیال خنک کاری	نتایج
۲۸/۶۵	۱۹۰/۵۳	Water-RT35HC(FCC)
۴۶/۷۵	۳۱۲/۹۲	Water-Sodium acetate (FCC)
۵۸/۹۱	۳۹۶/۸۱	Water-Magnesium nitrate (FCC)
۱/۶۶	۱۰/۵۳	Air-RT35HC(FCC)
۱/۶۸	۱۰/۷۶	Air-Sodium acetate (FCC)
۱/۶۸	۱۰/۷۴	Air-Magnesium nitrate (FCC)

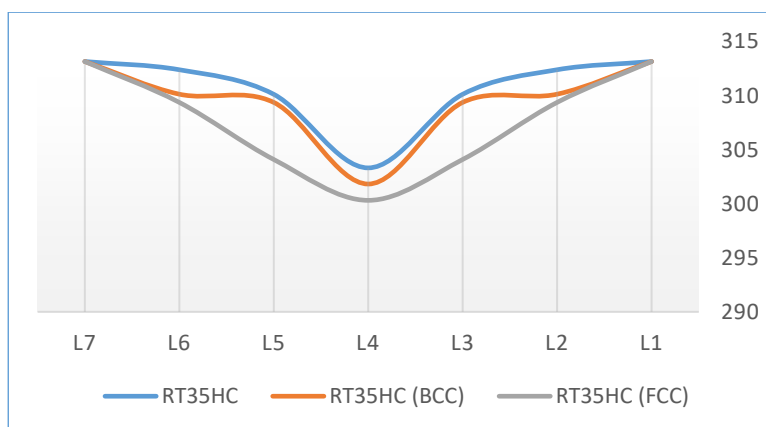
نتایج نمودار دما - مکان

در این بخش نمودارهای دما بر حسب مکان در هفت نقطه مختلف باطری‌ها در نظر گرفته شده است. این نمودارها در راستای محور Y میزان انتقال حرارت با واحد کیلو ژول و در محور X ۷ نقطه مختلف در مجموعه باطری را به تصویر می‌کشد. در شکل (۵) نقطه L1 و L7 دارای بیشترین دما به میزان ۳۱۳/۱۵ کیلوژول و در نقطه L4 دارای کمترین میزان حرارت با عدد ۳۱۳ کیلوژول می‌باشد. این نمودار بیانگر نمودار دما - مکان در حالت نرمال و بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده می‌باشد.



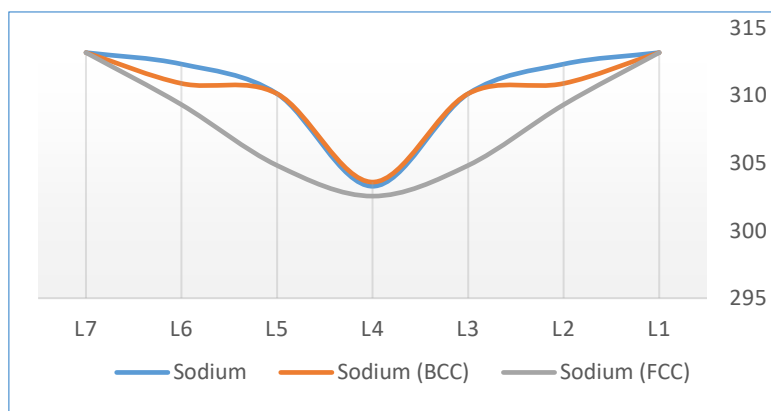
شکل ۵: نمودار دما - مکان در حالت نرمال

شکل (۶) نشان دهنده نمودار دما-مکان ماده RT35HC در هر سه حالت نرمال، ساختار مکعبی مرکز حجمی و ساختار مکعبی مرکز سطحی می‌باشد. همانطوری که در نمودار مشخص است این ماده با ساختار مکعبی مرکز سطحی دارای کمترین میزان حرارت و با ساختار نرمال دارای بیشترین میزان حرارت می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که ساختار مکعبی مرکز سطحی دارای بیشترین تاثیر در جهت کاهش انتقال حرارت را دارد.



شکل ۶: نمودار دما - مکان RT35HC در سه حالت

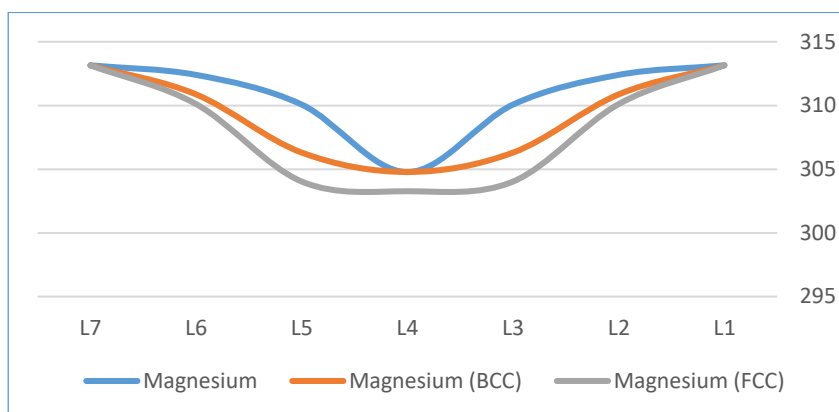
شکل (۷) نشان دهنده نمودار دما-مکان ماده سدیم در هر سه حالت نرمال، ساختار مکعبی مرکز حجمی و ساختار مکعبی مرکز سطحی می‌باشد. همانطوری که در نمودار مشخص است این ماده با هر سه ساختار دارای تفاوت زیادی نمی‌باشد اما بازهم ساختار مکعبی مرکز سطحی دارای کمترین میزان حرارت در این حالت است.



شکل ۷: نمودار دما - مکان سدیم در سه حالت



شکل (۸) نشان دهنده نمودار دما-مکان ماده منیزیم در هر سه حالت نرمال، مکعبی مرکز حجمی و ساختار مکعبی مرکز سطحی می‌باشد. در این ماده تشابه بسیار زیادی در شکل نمودار بین ماده با ساختار مکعبی مرکز حجمی و ماده با ساختار مکعبی مرکز سطحی وجود دارد. همانطوری که در نمودار مشخص است این ماده با ساختار مکعبی مرکز سطحی دارای کمترین میزان حرارت و با ساختار نرمال دارای بیشترین میزان حرارت می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که ساختار ساختار مکعبی مرکز سطحی همانند دو حالت گذشته دارای بیشترین تاثیر در جهت کاهش انتقال حرارت را دارد.



شکل ۸: نمودار دما - مکان منیزیم در سه حالت

بحث و نتیجه گیری

وجود ساختارهای شبکه تاثیر بسزایی در کاهش میزان انتقال حرارت و سرعت خنک شوندگی دارد. هردو ساختار مکعبی مرکز حجمی و مکعبی مرکز سطحی تاثیر بسیار خوبی در کاهش میزان انتقال حرارت و افزایش سرعت خنک شوندگی دارند. با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌گردد که ساختار شبکه مکعبی مرکز سطحی نسبت به ساختار شبکه مکعبی مرکز حجمی در کاهش انتقال حرارت تاثیر بیشتر و عملکرد بهتری دارد. این مهم می‌تواند به علت نوع چیدمان اتم‌های آن باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مواد تغییر فازدهنده بر حالت‌های مختلف خنک کاری باتری تاثیر دارند و از آنجایی که با کاهش دمای باتری عمر مفید آن افزایش پیدا می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که ساختارهای شبکه بر کارایی و عمر مفید باتری‌ها تاثیر مستقیم و معناداری دارند.

مراجع

- [1] Mohammadi, S.M.H., 2022. Technical and Economic Feasibility Study of the Use of Phase Change Materials (PCMs) in the Combination of Compression Refrigeration and Free Cooling Systems, Case Study: A Residential Building in Kerman. Journal of Solid and Fluid Mechanics, 12(1), pp.51-66.
- [2] Farajollahi, M. A., Nobakhti, M., Khayat, M., (2017). Numerical evaluation of cooling heating system management performance in Lithium Ion batteries, Journal of Mechanical Engineering and Vibration, 3, pp 37-47.
- [3] Talebzadegan, M., Moravej, M., Assareh, E., Izadi, M., (2022). Effect of aspect ratio on the melting process of carreau non-newtonian phase change material in the porous space between two vertical pipes, Journal of mechanical engineering, 4 (51), pp 305-314.
- [4] Mirakhorlo, M., Zagarabadi, M.R. and Valipour, M.S., (2021). Experimental Investigation of cooling photovoltaic panels using phase change material at different angles, New practical and computational findings in mechanical systems, 19-35.



- [5] Hemmati, R., Veysi, F. and Hadidi, B., (2020). Experimental investigation of thermal management system in power supply using phase change material (PCM)., *Scientific Journal of Energy Engineering and Management*, 10(1), pp 92-99.
- [6] Hekmat, S., Molaeimanesh, G.R., (2019). Experimental investigation on the performance of hybrid thermal management system based on water cooling and phase change material for a lithium battery module of an electric vehicle, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(4), pp 1-4.
- [7] Azizi, M., (2014). A review of the use of phase change materials in temperature control of battery types, *A Quarterly Publication the Application of Chemistry in Environment*, 2 (19), 21-32.
- [8] Wang, L., Zhang, Y., Zhang, X., Li, Y., (2021). Experimental investigation on the heat loss of long-term thermal storage using stable supercooling, *Solar Energy*, pp 121-130.
- [9] Riahi, S., Liu, M., Jacob, R., Belusko, M. and Bruno, F., (2020). Assessment of exergy delivery of thermal energy storage systems for CSP plants: Cascade PCMs, graphite-PCMs and two-tank sensible heat storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, p.100823.
- [10] Ahmed, N., Elfeky, K.E., Lu, L. and Wang, Q.W., (2020). Thermal performance analysis of thermocline combined sensible-latent heat storage system using cascaded-layered PCM designs for medium temperature applications. *Renewable energy*, 152, pp.684-697.
- [11] Wu, S., Yan, T., Kuai, Z. and Pan, W., (2020). Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review. *Energy Storage Materials*, 25, pp.251-295.
- [12] Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S., Shadloo, M.S. and Oztop, H.F., (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211, p.118698.
- [13] Rathore, P.K.S. and Shukla, S.K., (2019). Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 225, pp.723-744.
- [14] Sun, X., Medina, M.A. and Zhang, Y., (2019). Potential thermal enhancement of lightweight building walls derived from using Phase Change Materials (PCMs). *Frontiers in Energy Research*, 7, pp 1-13.
- [15] Liang, D., Bai, W., Chen, W. and Chyu, M.K., (2020). Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, p.119579.
- [16] Robinson, J.B., Darr, J.A., Eastwood, D.S., Hinds, G., Lee, P.D., Shearing, P.R., Taiwo, O.O. and Brett, D.J., (2014). Non-uniform temperature distribution in Li-ion batteries during discharge—A combined thermal imaging, X-ray micro-tomography and electrochemical impedance approach. *Journal of Power Sources*, 252, pp 51-57.