

# بررسی عددی مدیریت گرمایی باتری لیتیوم-یون با استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران،  
hrahmanian@jahromu.ac.ir

حسین رحمانیان کوشکی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، s.rahmanian@jahromu.ac.ir

سعید رحمانیان\*

## چکیده

هدف از پژوهش حاضر، خنک کاری یک باتری لیتیوم-یون با استفاده از دو حالت ماده‌ی تغییر فاز دهنده و ترکیب آن با فوم مس (سامانه هیبریدی) بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی است. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent و بر اساس مدل دو بعدی NTGK برای باتری و مدل آنتالپی-تخلخل برای ماده‌ی تغییر فاز دهنده صورت گرفت. تاثیر سرعت‌های دشارژ و ضریب انتقال گرمای همرفتی بررسی گردید. نتایج نشان داد که به کارگیری ماده‌ی تغییر فاز دهنده باعث کاهش دمای باتری به میزان  $11.97^{\circ}\text{C}$ ،  $32.22^{\circ}\text{C}$  و  $35.04^{\circ}\text{C}$  در ترتیب در سرعت‌های دشارژ ۱C، ۳C و ۵C شده است. با افزایش ضریب انتقال گرما همرفتی از  $0.5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  به  $10\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  در سامانه‌ی هیبریدی، بهبود ۱۰ درصدی در کاهش دمای باتری مشاهده گردید. در فرآیند بازیابی ماده‌ی تغییر فاز دهنده و در سرعت دشارژ ۵C، مدت زمان جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده در سامانه‌ی هیبریدی نسبت به ماده‌ی تغییر فاز دهنده به میزان ۴۵ درصد بهبود یافت. در نهایت وجود فوم فلزی باعث بهبود عملکرد سامانه‌ی مدیریت گرمایی شده است. **واژه‌های کلیدی:** باتری لیتیومی، ذخیره ساز گرمایی، خودروهای برقی، مدل NTGK، مدیریت گرمایی باتری، مواد تغییر فاز دهنده.

## Numerical analysis on the thermal management of lithium-ion battery using phase change material and metal foam

H. Rahmanian-Koushkaki  
S. Rahmanian

Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran

## Abstract

The purpose of current study is to investigate the cooling of a lithium-ion battery using two modes of phase change material and its combination with copper foam (hybrid system) based on computational fluid dynamics. The simulation was conducted using ANSYS-Fluent software, which NTGK and enthalpy-porosity models were used for battery and phase change material modeling, respectively. Effects of discharge rate (C) and convective heat transfer coefficient were studied. The findings showed that the use of PCM reduces the battery temperature by  $11.97^{\circ}\text{C}$  ,  $32.22^{\circ}\text{C}$  and  $35.04^{\circ}\text{C}$  in 1C, 3C and 5C discharge rates, respectively. By increasing the convective heat transfer coefficient from  $0.5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  to  $10\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  in the hybrid system, a reduction of 10% in battery temperature was investigated. In the recovery process of the PCM with discharge rate of 5C, the solidification time of phase change material in the hybrid system was enhanced by 45% compared to the phase change material system. Finally, it was concluded that the metal foam has improved the performance of battery thermal management system.

**Keywords:** Lithium-ion battery, Thermal energy storage, Electrical vehicle, NTGK model, Battery thermal management, Phase change material.

## ۱- مقدمه

وابستگی زیادی به دمای کارکردی دارد. این باتری‌ها در بازه‌ی دمایی ۲۵ الی ۴۰ درجه‌ی سلسیوس بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند [۲]. با توجه به پژوهش‌های پیشین دمای باتری‌ها بایستی کم‌تر از ۵۰ درجه سلسیوس و با گرادیان دمایی کم‌تر از ۵ درجه باشد [۳]. بنابراین برای حصول بیش‌ترین بازده از باتری نیاز به سامانه‌ی مدیریت گرمایی یا به اختصار BTMS می‌باشد. سامانه‌ی مدیریت گرمایی در باتری‌ها با خنک کاری باتری باعث بهبود عملکرد و کارایی، افزایش عمر مفید، ایمنی بهتر، پایداری شیمیایی و کارایی در شرایط محیطی مختلف خواهد شد. سامانه‌ی مدیریت گرمایی در باتری‌ها انواع مختلفی دارند که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. از این سامانه‌ها می‌توان خنک کاری طبیعی با هوا [۴]، خنک کاری با مایع به صورت مستقیم [۵]، خنک کاری با مایع به صورت غیر مستقیم

خودروهای الکتریکی (EV)<sup>۱</sup> به دلیل کاهش چشمگیر در انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهره‌وری انرژی بالاتر به عنوان یکی از پیشرفت‌های کلیدی در حمل و نقل پایدار شناخته شده‌اند. اهمیت باتری‌ها در خودروهای الکتریکی حایز اهمیت است، زیرا عملکرد، محدودی‌ حرکتی، ایمنی و عمر مفید این خودروها به طور مستقیم به فناوری باتری‌های استفاده شده بستگی دارد [۱].

باتری‌های لیتیوم-یون محبوب‌ترین نوع باتری برای خودروهای الکتریکی هستند. آن‌ها دارای چگالی انرژی بالا، وزن کم و عمر مفید طولانی هستند. از معایب آن‌ها می‌توان به هزینه‌ی بالاتر و نیاز به مدیریت گرمایی دقیق اشاره کرد. عملکرد باتری‌های لیتیوم-یون

<sup>۱</sup> Electric vehicles

<sup>۲</sup> Battery thermal management system

از طریق نصب کانال حامل مایع اطراف باتری [۶]، خنک کاری با لوله‌ی گرمایی [۷]، خنک کاری ترموالکتریک [۸]، خنک کاری با فلز مایع [۹]، خنک کاری با مواد تغییر فاز دهنده (PCM)<sup>۱</sup> و خنک کاری ترکیبی [۱۰] را نام برد.

استفاده از مواد تغییر فازدهنده در خنک‌کاری باتری‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در جذب و آزادسازی گرما به صورت کارآمد، به عنوان یک راه‌حل موثر برای مدیریت گرمایی باتری‌ها شناخته می‌شود. این مواد به دلیل داشتن گرمای نهان بالا، می‌توانند در دمای ثابت حجم زیادی از انرژی گرمایی را جذب کنند و از افزایش دمای بیش از حد باتری‌ها جلوگیری کنند. این ویژگی مواد تغییر فازدهنده باعث می‌شود تا آن‌ها به عنوان یک راه‌حل مناسب برای بهبود ایمنی و کارایی باتری‌ها در کاربردهای مختلف، به ویژه در خودروهای الکتریکی، مورد توجه قرار گیرند.

تحقیقات نشان داده است که استفاده از مواد تغییر فازدهنده در خنک‌کاری باتری‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی دمای باتری‌ها را کاهش دهد و از مشکلاتی مانند گرمایش بیش از حد و وقوع شرایط خطرناک جلوگیری کند. به عنوان مثال، یک مطالعه نشان داده است که استفاده از لایه‌های چندگانه PCM با مشخصات ترموفیزیکی مختلف می‌تواند دمای باتری را به طور موثر کاهش داده و زمان بازیابی سیستم را بهبود بخشد. همچنین، این مطالعه نشان داد که استفاده از مواد تغییر فازدهنده به دلیل کنترل دما و کاهش فرسایش و تخریب مواد داخلی باتری می‌تواند به افزایش عمر مفید باتری‌ها کمک کند [۱۱].

با این حال، چالش‌هایی نیز در استفاده از مواد تغییر فازدهنده وجود دارد. یکی از مشکلات اصلی رسانایی گرمایی پایین آن‌هاست که می‌تواند منجر به تجمع گرما و عملکرد ناکارآمد در شرایط عملیاتی شدید شود. برای رفع این مشکل، پژوهش‌ها به دنبال بهبود رسانایی گرمایی این مواد از طریق افزودن مواد کربنی مانند گرافیت و فلزات هستند. این افزودنی‌ها می‌توانند رسانایی گرمایی مواد تغییر فازدهنده را به طور قابل توجهی افزایش دهند و عملکرد خنک‌کاری را بهبود بخشند. به علاوه، سامانه‌های هیبریدی که از ترکیب مواد تغییر فازدهنده با خنک‌کاری مایع یا هوا استفاده می‌کنند، نشان داده‌اند که می‌توانند به طور موثر دمای باتری‌ها را کاهش داده و یکنواختی دما را بهبود بخشند، که این امر به ویژه برای بسته‌های باتری با توان بالا مناسب است [۱۲].

لوی و همکاران [۱۳] اینتر پژوهشی یک ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی هیبریدی تقویت‌شده با نانوسیلیکا را توسعه دادند که به مسایل رایج مانند نشت، تغییرات حجم و ناهمگنی در طول انتقال فاز می‌پرداخت. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ترکیب نانو سیلیس به طور قابل توجهی خواص ضد نشت و رسانایی گرمایی ماده تغییر فازدهنده را بهبود می‌بخشد، که منجر به افزایش بازده خنک‌کننده و دوام بهتر برای ماژول‌های باتری می‌شود [۱۳].

کائو و همکاران یک سیستم مدیریت گرمایی ترکیبی با ترکیب خنک‌کننده مایع با ماده‌ی تغییر فازدهنده برای بسته‌ی باتری ۲۰ سلولی استوانه‌ای لیتیوم-یون طراحی کردند. مطالعات تجربی و عددی

آن‌ها نشان داد که ادغام یک صفحه سرد با ماتریس PCM به طور قابل توجهی کنترل دما و یکنواختی را بهبود می‌بخشد. بهترین نتایج با حفظ دمای ورودی آب زیر ۴۰ درجه سلسیوس و بهینه سازی جریان به دست آمد [۱۴].

لوی و همکاران دوام بلندمدت ماژول‌های خنک‌کننده PCM و تأثیر آن‌ها بر بدتر شدن عملکرد باتری را در ۲۰۰ چرخه ارزیابی کردند. نتایج حاکی از آن بود که خنک‌کنندگی ماده‌ی تغییر فاز دهنده به طور قابل توجهی گرادیان دما و طول عمر چرخه‌ی باتری را تا بیش از ۶۵ درصد کاهش می‌دهد [۱۵].

مورالی تأثیر دمای محیط، سرعت شارژ، عمق تخلیه‌ی باتری و ضریب انتقال گرمای همرفتی را در خنک‌کاری یک باتری لیتیوم-یون مورد بررسی قرار داد. نتایج حاکی از آن بود که سرعت شارژ و ضریب انتقال گرمای همرفتی تأثیر بسزایی در دمای باتری داشتند [۱۶].

در تحقیقی (۲۰۲۳) مدیریت گرمایی یک ماژول باتری با استفاده از ترکیب ماده‌ی تغییر فازدهنده و خنک‌کاری فعال بررسی گردید. یافته‌های پژوهشگران حاکی از آن بود که با افزایش ضخامت ماده‌ی تغییر فاز دهنده، یکنواختی دمای بیش‌تری در سطح باتری مشاهده می‌شود. همچنین در دماهای بالا تأثیر خنک‌کاری با سیال به مراتب از خنک‌کاری با هوا بیش‌تر است [۱۷].

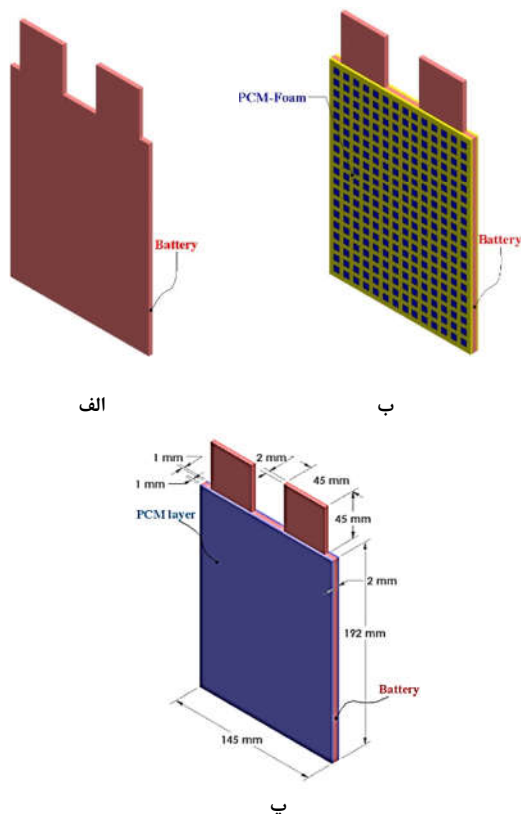
ساکسنا و همکاران به بررسی خنک‌کاری یک ماژول باتری لیتیوم-یون با استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی پرداختند. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین میزان تخلخل در مدیریت گرمایی باتری برابر با ۰/۹۵ و تعداد حفره در اینچ (PPI) مناسب برابر با ۳۰ می‌باشد [۱۸].

بررسی منابع انجام شده حاکی از آن است که مواد تغییر فازدهنده یک راه حل امیدوارکننده برای مدیریت گرمایی در سیستم‌های باتری، به ویژه برای کاربردهای پر قدرت مانند وسایل نقلیه الکتریکی ارایه می‌دهند. در حالی که سیستم‌های مبتنی بر این دسته از مواد پیشرفت‌های قابل توجهی در کنترل دما، یکنواختی گرمایی و ایمنی نشان داده‌اند، چالش‌هایی مانند رسانایی گرمایی پایین و پایداری مواد همچنان باقی مانده‌اند. تحقیق و توسعه مداوم در PCM‌های هیبریدی و سیستم‌های خنک‌کننده ترکیبی به پیشبرد اثربخشی و عملی بودن برنامه‌های PCM در مدیریت گرمایی باتری ادامه می‌دهد.

در پژوهش حاضر خنک‌کاری یک باتری لیتیوم-یون منشوری بر پایه‌ی مدل دو پتانسیلی NTGK و با استفاده از نرم افزار -Ansys Fluent مورد بررسی قرار گرفت. سامانه‌های مدیریت گرمایی به کار رفته شامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده و هیبرید ماده‌ی تغییر فازدهنده و فوم فلزی بودند. همچنین اثر ضریب انتقال گرمای محیط بر خنک‌کاری و جامد شدن ماده‌ی تغییر فازدهنده در چرخه بازیابی مورد بررسی قرار گرفت.

از جمله موارد نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از فوم فلزی در مدیریت گرمایی باتری‌ها، بررسی انجماد ماده‌ی تغییر فازدهنده در چرخه بازیابی و ضریب انتقال گرمای محیط اشاره کرد.

<sup>1</sup> Phase change material



شکل ۱- طرحواره‌های از الف- باتری بدون سامانه‌ی خنک کاری، ب- سامانه‌ی خنک کاری هیبرید ماده‌ی تغییر فاز دهنده- فوم و پ- سامانه‌ی خنک کاری ماده‌ی تغییر فاز دهنده

### ۳- معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر هر محیط ارایه شده‌اند. هم‌چنین فرضیات شبیه سازی حاضر عبارتند از:

الف- شبیه سازی سه بعدی و حالت گذرا دارد.

ب- دیواره‌های باتری و قاب مستطیلی از شرط عدم لغزش و شرط گرمایی عایق پیروی می‌کنند.

پ- فاز مایع در ماده‌ی تغییر فازدهنده به صورت نیوتونی، غیر قابل تراکم و لایه ای است.

ت- مدل بوزینسک برای شبیه سازی همرفت طبیعی اعمال شده است.

ث- ساختار فوم فلزی مس همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است.

ج- تحلیل انرژی غیر تعادلی بین ماده‌ی تغییر فازدهنده و لیگامان‌های فوم فلزی اعمال گردید.

### ۳-۱- مدل باتری

مدل NTGK یک مدل نیمه تجربی الکتروشیمیایی- گرمایی است که در نرم افزار Ansys-Fluent به منظور شبیه سازی باتری‌های لیتیوم-یون به صورت دو پتانسیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. این مدل بر اساس پژوهش‌های کیم و همکاران بسط داده شده است که

## ۲- شرح مساله

در این بخش رفتار گرمایی یک باتری منشوری لیتیوم-یون با ظرفیت ۱۴/۶ Ah در حالت تخلیه<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت. پروتکل تخلیه بدین صورت بود که باتری با ولتاژ اولیه‌ی ۷ V با سرعت‌های جریان ۱C، ۳C و ۵C تا ولتاژ ۳ ولت تخلیه می‌شود. برای خنک کاری باتری دو راهکار استفاده از ماده‌ی تغییر فازدهنده (RT-27) و استفاده از هیبرید ماده‌ی تغییر فازدهنده-فوم فلزی مس پیشنهاد گردید. این مواد در یک قاب مستطیلی از جنس آلومینیوم در اطراف بدنه اصلی باتری به ضخامت یک میلی متر قرار گرفتند. حین فرآیند تخلیه باتری، دمای متوسط و بیشینه‌ی دمای باتری و هم‌چنین دمای ماده‌ی تغییر فازدهنده و سرعت ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent نسخه‌ی ۲۰۲۲ انجام شد.

خواص باتری در جدول (۱) و خواص سایر مواد در جدول (۲) ارایه شده اند. در شکل (۱) نیز طرحواره‌ای از باتری، دو سامانه‌ی مدیریت گرمایی و هم‌چنین ابعاد نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص باتری لیتیوم-یون به کار رفته در پژوهش حاضر [۱۶]

پارامتر	کمیت/جنس
ظرفیت اسمی باتری	۱۴/۶ Ah
جنس قطب‌های مثبت و منفی باتری	مس
جنس بدنه‌ی باتری	پایه‌ی پلیمر
ولتاژ بیشینه (ولتاژ شروع)	۴/۲ V
ولتاژ کمینه (ولتاژ قطع)	۳ V

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته در پژوهش حاضر [۱۹،۲۰]

پارامتر	RT-27	مس	آلومینیوم
چگالی ( $\text{kg m}^{-3}$ )	۲۸۸ K در دمای ۲۸۸ K ۳۱۳ K در دمای ۷۷۰	۸۹۰۰	۲۷۱۹
گرمای ویژه ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	۲۵۰۰	۳۸۶	۸۷۱
رسانایی گرمایی ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	۰/۲	۳۸۷/۶	۲۰۲/۴
لزجت دینامیکی (Pa s)	۰/۰۰۱۳۷۲	.....	.....
گرمای نهان ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )	۱۷۹	.....	.....
دمای ذوب (K)	۲۹۹ در فاز جامد ۳۰۱ در فاز مایع	.....	.....

<sup>۱</sup> Discharge

$$\frac{\partial \rho_{PCM}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_{PCM} \vec{V}) = 0 \quad (9)$$

$$\rho_{PCM} \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = -\nabla P + \mu_{PCM} \nabla^2 \vec{V} - \rho_{PCM} \beta_{PCM} \vec{g} (T_{PCM} - T_0) - \vec{S} - \vec{F} \quad (10)$$

در معادله‌ی (۱۰) پارامتر S چشمه‌ی گرمایی در معادلات تکانه‌ی خطی است که مطابق با رابطه‌ی (۱۱) بدست خواهد آمد. هم‌چنین مقدار کسر مایع از رابطه‌ی (۱۲) استخراج می‌شود. مقدار  $A_{mushy}$  ثابت بوده که در این تحقیق معادل  $10^6$  و  $\epsilon$  مقدار ثابت  $0.01$  می‌باشد [۲۴].

$$\vec{S} = A_{mushy} \frac{(1-L_f)^2}{L_f^2 + \epsilon} \vec{V} \quad (11)$$

$$L_f = \frac{T_{PCM} - T_s}{T_l - T_s} \quad (12)$$

معادله‌ی پایستگی انرژی از رابطه‌ی (۱۳) بدست آمده که در آن  $H_{PCM}$  آنتالپی ماده‌ی تغییر فاز دهنده می‌باشد که از رابطه‌ی (۱۴) بدست می‌آید.

$$(\rho C_p)_{PCM} \left[ \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla T_{PCM}) \right] + \rho_{PCM} \frac{\partial H_{PCM}}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{PCM} \nabla T_{PCM}) \quad (13)$$

$$H_{PCM} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T (C_p)_{PCM} dT + \frac{L_f h_{sl}}{latent} \quad (14)$$

با قرار دادن فوم فلزی در ماده‌ی تغییر فاز دهنده، ترم  $\vec{F}$  مطابق رابطه‌ی ذیل بدست خواهد آمد:

$$\vec{F} = \left( \frac{\mu_{PCM}}{K} + \frac{\rho_{PCM} C_f |\vec{V}|}{\sqrt{K}} \right) \vec{V} \quad (15)$$

ضرایب فورشه‌یامر (C<sub>i</sub>) و نفوذپذیری (K) مطابق روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند [۲۵].

$$C_f = 0.00212 (1 - \epsilon)^{-0.132} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (16)$$

$$K = 0.00073 d_p^2 (1 - \epsilon)^{-0.224} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.11} \quad (17)$$

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \left( \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{1 - \epsilon}{0.04}\right)} \right) \sqrt{\frac{1 - \epsilon}{3\pi}} \quad (18)$$

$$d_p = \frac{0.0254}{PPI} \quad (19)$$

در روابط فوق پارامترهای  $d_p$ ،  $\epsilon$  و PPI به ترتیب قطر فیبرهای لیگامان، قطر حفره، تخلخل فوم و چگالی حفره (تعداد حفره در هر اینچ) می‌باشند. با توجه به این‌که از مدل گرمایی غیر تعادلی برای محاسبه‌ی توزیع دما در هیبرید ماده‌ی تغییر فاز دهنده- فوم فلزی استفاده شد، بنابراین معادله‌ی پایستگی انرژی در این حالت به صورت جداگانه برای ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی مطابق روابط ذیل در نظر گرفته شد [۲۵].

$$\epsilon (\rho C_p)_{PCM} \left[ \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T_{PCM} \right] = k_{eff,PCM} \nabla^2 T_{PCM} - \epsilon \frac{\partial H_{PCM}}{\partial t} + h_{sf} A_{sf} (T_{foam} - T_{PCM}) \quad (20)$$

$$(1 - \epsilon) (\rho C_p)_{foam} \frac{\partial T_{foam}}{\partial t} = k_{eff,foam} \nabla^2 T_{foam} - h_{sf} A_{sf} (T_{foam} - T_{PCM}) \quad (21)$$

زیرمجموعه‌ای از مدل MSMD<sup>۱</sup> است [۲۲]. معادلات حاکم بر این مدل به شرح ذیل می‌باشند.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + Q_g \quad (1)$$

$$\nabla (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -(j_{Ech} - j_{short}) \quad (2)$$

$$\nabla (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{Ech} - j_{short} \quad (3)$$

$$j_{Ech} = \alpha Y [U - (\phi_+ - \phi_-)] \quad (4)$$

$$U = a_0 + a_1 (DOD) + a_2 (DOD)^2 + a_3 (DOD)^3 \quad (5)$$

$$Y = a_4 + a_5 (DOD) + a_6 (DOD)^2 \quad (6)$$

$$DOD = \frac{\int_0^t J dt}{Q_T} \quad (7)$$

در این روابط  $\sigma_+$  و  $\sigma_-$  به ترتیب رسانایی گرمایی قطب‌های مثبت و منفی باتری،  $\phi_+$  و  $\phi_-$  به ترتیب فاز پتانسیل برای قطب‌های مثبت و منفی باتری می‌باشند. هم‌چنین  $Q_g$  میزان گرمای تولیدی توسط باتری،  $j_{Ech}$  شدت انتقال جریان حجمی و  $j_{short}$  شدت انتقال جریان است. علاوه بر این  $\alpha$  مساحت مخصوص الکتروود و U و Y ضرایب مدل NTGK بوده که تابعی از عمق تخلیه‌ی باتری (DOD<sup>۲</sup>) می‌باشند. ضرایب ثابت  $a_0$  الی  $a_6$  نیز پارامترهای برازش چندجمله‌ای‌های موجود در روابط (۵) و (۶) می‌باشند.

## ۲-۳- ماده‌ی تغییر فاز دهنده و هیبرید ماده‌ی تغییر فاز دهنده- فوم فلزی

برای شبیه سازی فرآیند ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شد. بدین منظور کمیتی با نام کسر مایع<sup>۳</sup> ( $L_f$ ) تعریف شده که نشان دهنده‌ی حجمی از سلول محاسباتی است که در فاز مایع قرار دارد، مطابق با معادله‌ی (۸)، نواحی مختلف حل به سه شکل تعریف می‌شوند [۲۳]:

$$L_f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (8)$$

الف- ناحیه به طور کامل جامد است.  $L_f = 0$

ب- ناحیه به طور کامل مایع است.  $L_f = 1$

پ- ناحیه شامل فاز جامد و مایع (ناحیه‌ی خمیری<sup>۴</sup>) است.  $0 < L_f < 1$

به منظور مدل کردن تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده بایستی معادلات پایستگی در سراسر دامنه‌ی حل مورد بررسی قرار گیرند.

معادلات پایستگی جرم (معادله‌ی پیوستگی) و پایستگی تکانه‌ی خطی به شرح معادلات (۹) و (۱۰) می‌باشند:

<sup>۱</sup> Multi-scale multi-dimensional

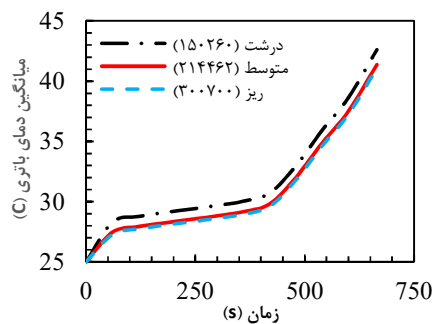
<sup>۲</sup> Depth of discharge

<sup>۳</sup> Liquid fraction

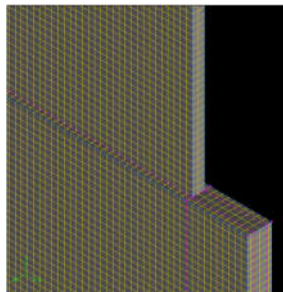
<sup>۴</sup> Mushy zone

استفاده گردید. شایان ذکر است میزان تخلخل فوم برابر با ۰/۹ و مقدار PPI برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد.

به منظور اطمینان از استقلال نتایج از اندازه‌ی شبکه، سه شبکه با ابعاد ۱۵۰۲۶۰ (درشت)، ۲۱۴۴۹۲ (متوسط) و ۳۰۰۷۰۰ (ریز) در نظر گرفته شد و میانگین دمای باتری در هر شبکه بررسی گردید. شبکه از نوع ساختار یافته انتخاب شد و شبیه سازی برای خنک کاری با هیبرید ماده تغییر فاز دهنده- فوم فلزی در حالت دشارژ ۵C و با بازه‌ی زمانی ۰/۱ s انجام گرفت. بررسی نتایج در شکل ۲-الف نشان داد که با گذر از شبکه‌ی متوسط به ریز تغییر محسوس در میانگین دمای سلول باتری مشاهده نمی‌شود. بنابراین برای صرفه جویی در هزینه‌های محاسباتی شبکه‌ی متوسط انتخاب گردید. نمایی از شبکه‌ی انتخاب شده در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود.



شکل ۲-الف - بررسی استقلال شبکه



شکل ۲-ب - نمایی از شبکه‌ی انتخاب شده

برای بررسی استقلال گام زمانی سه بازه‌ی زمانی ۰/۰۵ s، ۰/۱ s و ۰/۲ s برای شبیه سازی باتری مجهز به سامانه‌ی هیبریدی با تعداد شبکه‌ی ۲۱۴۴۹۲ بررسی گردید (شکل ۳). روند تغییرات دمای سطح سلول نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین سه بازه‌ی زمانی انتخاب شده وجود ندارد. بنابراین در ادامه بازه‌ی زمانی ۰/۱ s در شبیه سازی لحاظ گردید. به منظور اعتبارسنجی نتایج، نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعه‌ی تجربی کیم و همکاران [۲۶] مقایسه گردید. نتایج شکل ۴ حاکی از آن است که نتایج مدل سازی عددی حاضر همخوانی مناسبی با مرجع مورد اشاره دارد.

$$A_{sf} = \frac{3\pi d_f}{d_p^2} \quad (22)$$

$$h_{sf} = \frac{k_{PCM}}{d_f} \left( 0.36 + \frac{0.518 \times \left( \frac{g\beta\Delta T d_f^3}{\alpha_{PCM} \nu_{PCM}} \right)^{\frac{1}{4}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right) \quad (23)$$

$$k_e = \frac{\sqrt{2}}{2(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{4D}{(2 \times 0.16^2 + \pi D(1 - 0.16))A_1 + (4 - 2 \times 0.16^2 - \pi D(1 - 0.16))A_2} \quad (25)$$

$$R_2 = \frac{(0.16 - 2D)^2}{((0.16 - 2D) \times 0.16^2)A_1 + (2 \times 0.16 - 4D - (0.16 - 2D) \times 0.16^2)A_2} \quad (26)$$

$$R_3 = \frac{\sqrt{2} - 2 \times 0.16}{(\sqrt{2}\pi D^2)A_1 + (2 - \sqrt{2}\pi D^2)A_2} \quad (27)$$

$$R_4 = \frac{2 \times 0.16}{0.16^2 \times A_1 + 4 \times 0.16^2 \times A_2} \quad (28)$$

$$D = \frac{\sqrt{2} \times \left( 2 - \frac{3 \times 0.16^3 \times \sqrt{2}}{4} - 2\varepsilon \right)}{\pi(3 - 2 \times 0.16 \times \sqrt{2} - 0.16)} \quad (29)$$

$$k_{td} = \frac{0.36\rho_{PCM}(C_p)_{PCM}d_m|\vec{V}|}{1 - \varepsilon} \quad (30)$$

$$k_{eff,pcm} = (k_e)_{k_m=0} + k_{td} \quad (31)$$

$$k_{eff,foam} = (k_e)_{k_m=k_{pcm}} \quad (32)$$

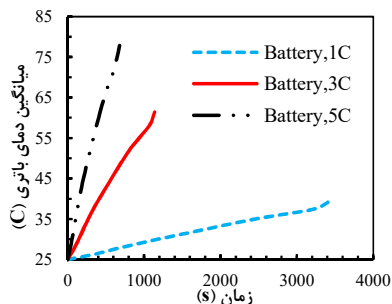
### ۳-۳- شروط مرزی و اولیه

شروط اولیه‌ی فرآیند شبیه سازی دمای ثابت برابر با ۲۵°C است. همچنین شرط مرزی عایق و عدم لغزش بر تمامی دیواره‌ها اعمال گردید. علاوه بر این برای بررسی تاثیر ضریب انتقال گرما، شرط مرزی همرفتی با دمای محیط ۲۵°C بر دیواره‌ها اعمال شد.

### ۳-۴- روند حل

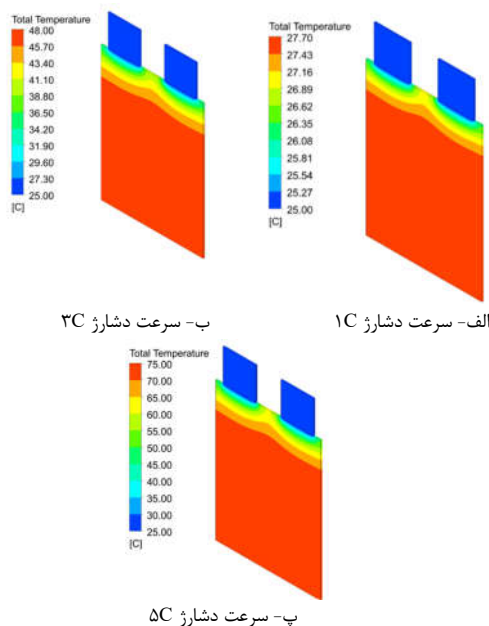
حل عددی معادلات حاکم بر اساس شروط مرزی و اولیه ارایه شده، بر پایه‌ی روش احجام محدود و با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent نسخه‌ی ۲۰۲۲ انجام گرفت. به منظور مدیریت کوپلینگ فشار- سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده شد. گسسته سازی معادله‌ی فشار بر اساس روش PRESTO! و گسسته سازی معادلات انرژی و مومنوم با استفاده از روش پیش رو مرتبه دوم<sup>۱</sup> انجام شد. معیارهای همگرایی برای باقی مانده‌های معادلات بقای جرم، مومنوم و انرژی به ترتیب  $10^{-6}$ ،  $10^{-6}$  و  $10^{-8}$  در نظر گرفته شد. به منظور اعمال مدل گرمایی غیر تعادلی از تابع تعریفی کاربر (UDF) استفاده شد. همان‌گونه که پیش از این نیز اشاره شد، از ماده‌ی تغییر فاز دهنده RT-27 و فوم فلزی مس

<sup>1</sup> Second order upwind



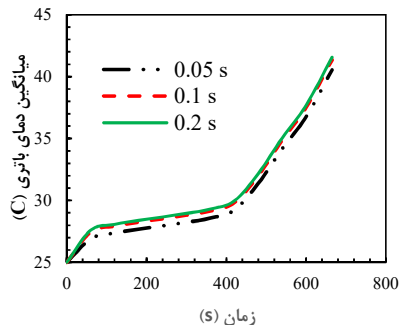
شکل ۵- تغییرات دمای سلول باتری با سرعت دشارژهای مختلف

همان‌گونه که در کانتورهای توزیع دمای سطح سلول مشخص است (شکل ۶)، سردترین نقاط سطح سلول در محل تب‌های باتری رخ داده است. با توجه به این‌که در محل تب‌ها واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد و عامل تولید گرما در آن‌ها صرفاً گرمایش اهمی است، این نقاط خنک‌ترین نقاط سلول باتری هستند. هم‌چنین با افزایش سرعت دشارژ، دمای بیشینه سطح باتری اندکی به سمت سطح پایین باتری میل کرده است. در سرعت دشارژ پایین گرما تولید شده عمدتاً از محل تب‌ها دفع می‌شود. با افزایش سرعت دشارژ، فرصت انتقال گرما از نواحی پایین به تب‌ها محدودتر است و لذا دمای بیشینه در نواحی پایین تر قابل مشاهده است. [۲۹].

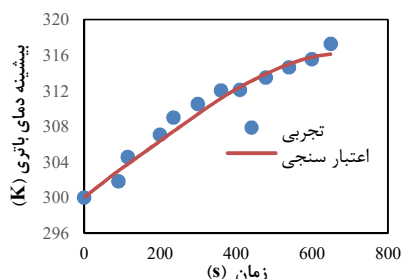


شکل ۶- توزیع دمای سلول باتری فاقد سامانه‌ی مدیریت گرمایی با سرعت دشارژهای مختلف در زمان ۶۰۰ ثانیه

با توجه به نتایج بدست آمده دمای بیشینه بیش تر از ۵۰ درجه و گرادیان دمایی بیش تر از ۵ درجه مشاهده شد. بنابراین وجود سامانه‌ی مدیریت گرمایی باتری الزامی است که در ادامه به این مهم پرداخته می‌شود.



شکل ۳- بررسی استقلال بازه‌ی زمانی



شکل ۴- اعتبار سنجی نتایج

#### ۴- نتایج

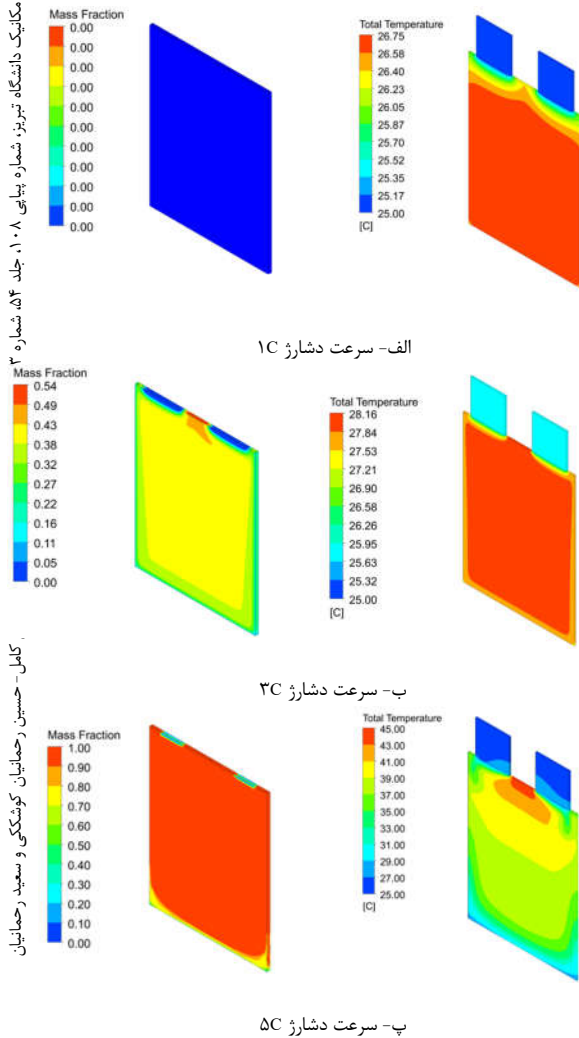
در این بخش، برای مقایسه‌ی تاثیر اعمال سامانه‌های مدیریت گرمایی بر باتری، ابتدا توزیع دما بر روی سطح سلول باتری بدون سامانه به ازای سه سرعت دشارژ ۱C، ۳C و ۵C بررسی خواهد شد. سپس تاثیر سامانه‌ها بر توزیع دما مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است شرط مرزی عایق بر تمامی دیواره‌های خارجی اعمال گردید. پس از آن فرآیند جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده در چرخه مجدد دشارژ و هم‌چنین تاثیر جریان همرفتی محیط در سامانه‌ی مدیریت گرمایی هیبریدی مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### ۴-۱- نتایج مربوط به باتری بدون سامانه‌ی مدیریت

##### گرمایی

همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، با گذشت زمان دمای سلول باتری برای تمامی سرعت‌های دشارژ افزایش می‌یابد. این افزایش برای سرعت دشارژ ۱C کم‌ترین مقدار و برای سرعت دشارژ ۵C بیش‌ترین مقدار را دارد. به عبارتی در انتهای زمان تخلیه، با افزایش سرعت دشارژ از ۱C به ۳C و پس از آن ۵C، دمای باتری از  $39/44^{\circ}\text{C}$  به ترتیب به  $61/40^{\circ}\text{C}$  و  $77/82^{\circ}\text{C}$  رسیده است. دلیل این افزایش دما، افزایش گرمای تولید شده در سرعت‌های دشارژ بالا می‌باشد [۲۷]. هم‌چنین مدت زمان تخلیه برای سرعت دشارژ ۱C بیش‌ترین و برای سرعت دشارژ ۵C کم‌ترین است. شایان ذکر است این افزایش دما باعث تخریب زودرس باتری در سرعت‌های دشارژ بالا خواهد شد [۲۸].

همان گونه که مشخص است با افزایش سرعت دشارژ دمای سطح سلول باتری افزایش و سرعت ذوب PCM نیز افزایش یافته است.



شکل ۹- توزیع دمای سلول باتری و هم‌چنین درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده در سامانه‌ی مدیریت گرمایی PCM با سرعت دشارژهای مختلف در زمان ۶۰۰ ثانیه

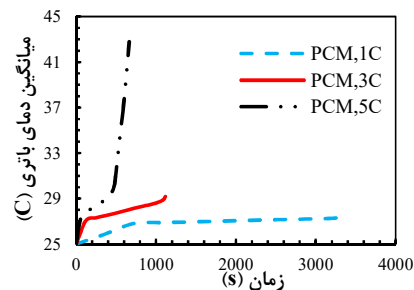
### ۳-۴- سامانه‌ی مدیریت گرمایی بر مبنای PCM-Foam

یکی از معایب مواد تغییر فاز دهنده، پایین بودن رسانایی گرمایی است. یکی از روش‌های افزایش این پارامتر در این دسته از مواد استفاده از فوم فلزی در ماده‌ی تغییر فاز دهنده می‌باشد. نتایج استفاده از هیبرید PCM-Foam در این بخش ارائه شده است. نتایج حاصل از این قسمت حاکی از آن است که با قراردادن فوم فلزی در ماده‌ی تغییر فاز دهنده کاهش محسوس و قابل توجهی در دمای سطح سلول باتری نسبت به استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده به تنهایی رخ نداده است (شکل ۱۰). دلیل این امر ناشی از آن است که با وجود فوم فلزی مکانیزم انتقال گرمای رسانش افزایش یافته ولی مکانیزم انتقال گرمای همرفتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین به دلیل ضخامت کم ماده‌ی تغییر فاز دهنده، قرارگیری فوم فلزی تاثیر محسوسی در کاهش دمای سطح

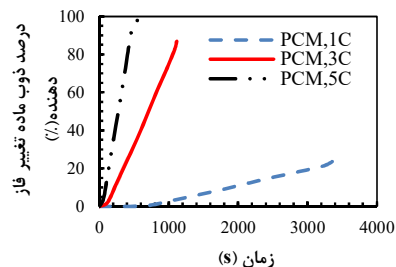
### ۲-۴- سامانه‌ی مدیریت گرمایی بر مبنای PCM

شکل ۷ تغییرات دمای سطح باتری در سرعت‌های دشارژ سه گانه با اعمال سامانه‌ی مدیریت گرمایی بر مبنای PCM نمایش می‌دهد. دمای نهایی سطح سلول در انتهای فرآیند دشارژ برای حالت‌های ۱C، ۳C و ۵C به ترتیب  $27/47^{\circ}\text{C}$ ،  $29/18^{\circ}\text{C}$  و  $42/78^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. با توجه به سرعت بالای گرم شدن باتری در سرعت دشارژ ۵C، شیب نمودار بعد از گذر از دمای ذوب ۲۹ درجه افزایش یافته است. این رفتار ناشی از جذب انرژی گرمایی به صورت گرمای نهان ذوب توسط ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد.

تغییرات درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودار مشخص است، با افزایش سرعت دشارژ باتری، فرآیند ذوب PCM زودتر شروع شده است. در انتهای فرآیند تخلیه، میزان درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده برای سرعت‌های دشارژ ۱C، ۳C و ۵C به ترتیب  $25/18$ ،  $86/78$  و  $99/70$  درصد بود. این نتایج با پژوهش معاونی و همکاران تطابق داشت [۳۰]. با اعمال این سامانه‌ی مدیریت گرمایی، دمای سطح سلول باتری نسبت به حالت بدون سامانه مدیریت گرمایی (قسمت ۴-۱) در هر سه سرعت دشارژ کاهش یافت. این میزان کاهش برای حالت‌های ۱C، ۳C و ۵C به ترتیب  $11/97^{\circ}\text{C}$ ،  $32/22^{\circ}\text{C}$  و  $35/04^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. دلیل این کاهش دما این است که به دلیل گرمای نهان بالای PCM، گرمای تولید شده در باتری در سطح سلول تجمع نکرده و صرف ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده شده است. بنابراین افزایش دمای سطح سلول باتری به میزان کم‌تری رخ داده است [۳۱].

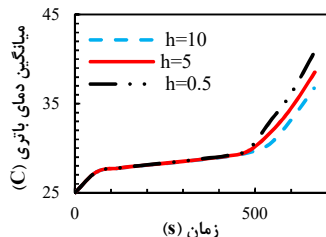


شکل ۷- تغییرات دمای سلول باتری با سرعت دشارژهای مختلف با اعمال سامانه مدیریت گرمایی PCM



شکل ۸- تغییرات درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده

شکل ۹ کانتورهای توزیع دمای سطح سلول باتری و هم‌چنین درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده را در زمان ۶۰۰s نمایش می‌دهد.

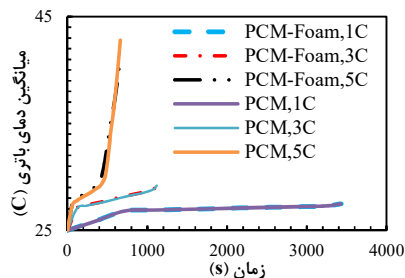


شکل ۱۲- تغییرات میانگین دمای باتری در سامانه‌ی هیبریدی برای سه ضریب انتقال گرمای همرفتی

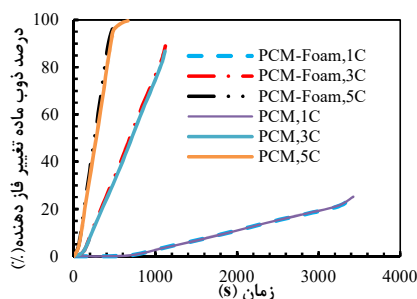
#### ۴-۵- بازیابی ماده‌ی تغییر فاز دهنده

همان گونه که مشخص است در فرآیند شارژ/دشارژ باتری ماده‌ی تغییر فاز دهنده گرمای باتری را جذب کرده و ذوب می‌شود. با توجه به این که پس از ذوب کامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده، عملاً هر دو سامانه‌ی مدیریت گرمایی در باتری بدون استفاده خواهند بود و تا جامد شدن مجدد توانایی خنک کاری باتری را نخواهند داشت، بنابراین در این بخش بازیابی ماده‌ی تغییر فاز دهنده در هر دو سامانه بررسی شد. با فرض ذوب کامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده در ابتدای فرآیند بازیابی، شکل ۱۳ روند انجماد را با ضریب انتقال همرفتی  $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است در دمای محیط  $25^\circ\text{C}$ ، سامانه‌ی PCM پس از  $8700 \text{ s}$  به میزان انجماد ۹۰ درصد (ذوب ۱۰ درصد) رسیده است. در حالی که این زمان در شرایط مشابه برای سامانه‌ی PCM-Foam برابر با  $4800 \text{ s}$  بوده است. به عبارتی سامانه‌ی مبتنی بر ماده‌ی هیبریدی در این خصوص ۴۵ درصد نسبت به ماده‌ی تغییر فاز دهنده بهبود نشان داده است. به دلیل وجود ماده‌ی متخلخل فوم فلزی در سامانه‌ی PCM-Foam مکانیزم انتقال گرمای رسانشی افزایش یافته که در نهایت منجر به زودتر جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده خواهد شد [۳۲]. بنابراین سامانه‌ی مدیریت گرمایی هیبریدی PCM-Foam عملکرد به مراتب بهتری دارد. علاوه بر این در مورد سامانه PCM از انجماد حدود ۹۰ درصدی، سرعت انجماد به دلیل مقاومت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده به شدت کاهش یافته است. در ادامه تاثیر دمای محیط بر فرآیند جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده در سامانه‌ی مدیریت گرمایی PCM-Foam بررسی گردید. با کاهش دمای محیط از  $25^\circ\text{C}$  به  $20^\circ\text{C}$  و پس از آن  $15^\circ\text{C}$ ، مدت زمان جامد شدن PCM به ترتیب از  $4800 \text{ s}$  به  $1800 \text{ s}$  و  $1040 \text{ s}$  رسید. بنابراین کاهش دمای محیط تاثیر مثبتی بر فرآیند جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده داشته است.

سلول نداشته است. شایان ذکر است، با توجه به این که در باتری محدودیت در ابعاد وجود دارد، نمی‌توان از ضخامت‌های بالای سامانه‌های مدیریت گرمایی استفاده نمود. تغییرات درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده نیز برای دو حالت اشاره شده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. با توجه به ضخامت نسبتاً کم ماده‌ی تغییر فاز دهنده و محدودیت در ابعاد باتری، اضافه شدن فوم فلزی تاثیر محسوسی در سرعت ذوب PCM نداشته است.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی تغییرات دمای سلول باتری با سرعت دشارژهای مختلف با اعمال سامانه مدیریت گرمایی PCM و PCM-Foam



شکل ۱۱- مقایسه‌ی تغییرات درصد ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده با سرعت دشارژهای مختلف با اعمال سامانه مدیریت گرمایی PCM و PCM-Foam

#### ۴-۴- تاثیر ضریب انتقال گرمای همرفتی

یکی از موارد بسیار مهم در خنک کاری باتری ضریب انتقال گرمای همرفتی محیط است. بدین منظور انتقال گرمای همرفت برای همه سطوح باتری به غیر از تب‌ها در سامانه‌ی PCM-Foam با سرعت دشارژ  $5 \text{ C}$  و با سه ضریب انتقال گرمای همرفتی  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ،  $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  و  $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  بررسی گردید. همان گونه که در شکل ۱۲ مشخص است با افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی، خنک کاری باتری بهتر انجام شده و میانگین دمای باتری کاهش یافته است. به طوری که در ضریب  $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  دمای سطح سلول باتری برابر با  $40.95^\circ\text{C}$  می‌باشد. این مقدار برای ضرایب  $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  و  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  به ترتیب  $38.54^\circ\text{C}$  و  $36.73^\circ\text{C}$  می‌باشد.



منظور مدیریت گرمایی باتری استفاده گردید. تاثیر سه سرعت دشارژ باتری (۱C، ۳C و ۵C) و ضریب انتقال گرمای همرفتی محیط ( $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ،  $1.0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  و  $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) بر خنک کاری باتری مطالعه شد. در ادامه فرآیند انجماد ماده‌ی تغییر فاز دهنده در چرخه بازایی مورد پژوهش قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشند:

الف- با افزایش سرعت دشارژ، میزان گرمای تولید شده در باتری افزایش و دمای سطح سلول در انتهای فرآیند تخلیه‌ی باتری افزایش یافت. به طوری که میانگین دمای سطح باتری در سرعت دشارژ ۱C معادل  $39/44^\circ\text{C}$  و در سرعت دشارژ ۳C و ۵C به ترتیب  $61/40^\circ\text{C}$  و  $77/82^\circ\text{C}$  بود.

ب- استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده باعث کاهش دمای سطح سلول باتری شد. این کاهش در سرعت‌های دشارژ ۱C، ۳C و ۵C به ترتیب  $11/97^\circ\text{C}$ ،  $32/22^\circ\text{C}$  و  $35/04^\circ\text{C}$  می‌باشد. اما با توجه به پایین بودن رسانایی گرمایی این ماده، محدودیت در این بهبود وجود دارد.

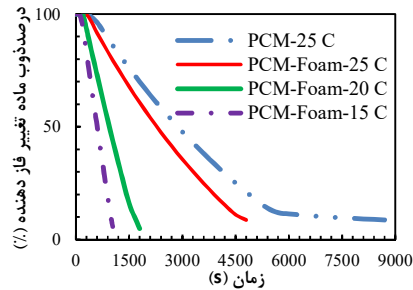
پ- با توجه به ضخامت کم ماده‌ی تغییر فاز دهنده و محدودیت در ابعاد باتری، استفاده از هیبرید ماده‌ی تغییر فاز دهنده- فوم فلزی تاثیر محسوسی در فرآیند خنک کاری باتری نسبت به ماده‌ی تغییر فاز دهنده نداشت.

ت- با افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی محیط از  $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  به  $1.0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ، دمای سطح باتری مجهز به سامانه‌ی هیبریدی بهبود ۱۰ درصدی یافت.

ث- با اعمال سامانه‌ی هیبریدی مدت زمان جامد شدن ماده‌ی تغییر فاز دهنده در شرایط مشابه و یکسان حدودا ۴۵ درصد کاهش یافت.

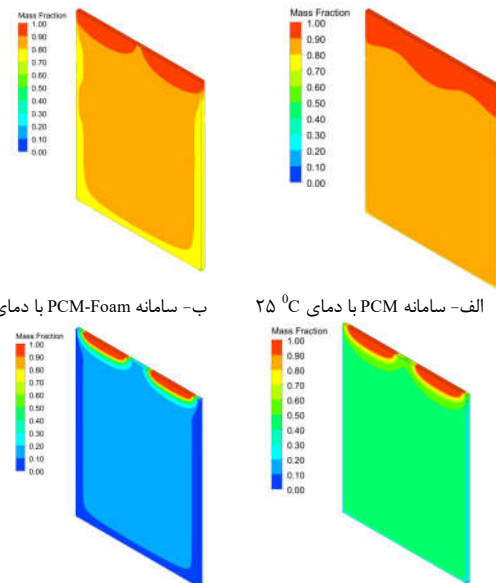
## ۶- مراجع

- [۱] تجاری ب، میرزایی م، طاحونی ا. طراحی سیستم کنترل بهینه‌ی توزیع گشتاور با رویکرد پیش بین به منظور بهبود پایداری و کاهش مصرف انرژی در خودروی الکتریکی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز.
- [2] Lin J, Liu X, Li S, Zhang C, Yang S. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *Int J Heat Mass Transf.* 2021 Mar 1;167:120834.
- [3] Wang J, Yu Y, Song L, Yue Y, Zeng W, Mei W, et al. Thermal management performance and optimization of a novel system combining heat pipe and composite fin for prismatic lithium-ion batteries. *Energy Convers Manag.* 2024 Feb 15;302:118106.
- [4] Thakur AK, Prabakaran R, Elkadecem MR, Sharshir SW, Ancı M, Wang C, et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *J Energy Storage.* 2020;32:101771.
- [5] Hirano H, Tajima T, Hasegawa T, Sekiguchi T, Uchino M. Boiling liquid battery cooling for electric vehicle. In: 2014 IEEE conference and expo transportation electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). IEEE; 2014. p. 1-4.
- [6] Wiriyasart S, Hommalee C, Sirikasemsuk S, Prurapark R, Naphon P. Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules. *Case Studies in Thermal Engineering.* 2020 Apr 1;18:100583.
- [7] Wang Q, Jiang B, Xue QF, Sun HL, Li B, Zou HM, et al. Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes. *Appl Therm Eng.* 2015 Sep 5;88:54-60.



شکل ۱۳- تغییرات درصد انجماد ماده‌ی تغییر فاز دهنده در چرخه بازایی در هر دو سامانه مدیریت گرمایی

شکل ۱۴ کانتورهای درصد ذوب حین فرآیند انجماد در چرخه بازایی ماده‌ی تغییر فاز دهنده در دو سامانه را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در شرایط یکسان محیطی، در سامانه PCM-Foam ماده‌ی تغییر فاز دهنده زودتر باز یافت شده است. همچنین با کاهش دمای محیط، فرآیند انجماد زودتر انجام شده است. شایان ذکر است ناحیه‌ی فوقانی باتری در تماس و تبادل گرمایی با تب‌ها می‌باشد. با توجه به اعمال انتقال گرمای همرفتی در تمامی سطوح به غیر از تب‌ها، انجماد ماده تغییر فاز دهنده در مجاورت تب‌ها کم تر است (درصد ذوب بیش تر است).



پ- سامانه PCM-Foam با دمای  $20^\circ\text{C}$       ت- سامانه PCM-Foam با دمای  $15^\circ\text{C}$

شکل ۱۴- کانتورهای انجماد در چرخه بازایی ماده‌ی تغییر فاز دهنده در دو سامانه‌ی مدیریت گرمایی

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی فرآیند دشارژ یک باتری لیتیوم-یون با ظرفیت ۱۴/۶ Ah بر مبنای مدل NTGK بررسی گردید. در ادامه دو سامانه متشکل از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و همچنین هیبرید ماده‌ی تغییر فاز دهنده- فوم فلزی مس به

- [24] Rahmanian-Koushkaki H, Rahmanian S, Setareh M. Effect of local mechanical oscillation on the performance of PCM thermal energy storage with various unit configurations. *J Energy Storage*. 2024 May 30;88 .
- [25] Rahmanian-Koushkaki H, Rahmanian S, Moein-Jahromi M, Sopian K. Performance evaluation of concentrated photovoltaics with phase change materials embedded metal foam-based heat sink using gradient strategy. *Int J Energy Res*. 2022 ;
- [26] Seong Kim U, Yi J, Shin CB, Han T, Park S. Modeling the Dependence of the Discharge Behavior of a Lithium-Ion Battery on the Environmental Temperature. *J Electrochem Soc*. 2011;158(5):A611 .
- [27] Mavi A, Arslan O. Numerical investigation on the thermal management of Li-ion batteries for electric vehicles considering the cooling media with phase change for the auxiliary use. *J Energy Storage*. 2024 Jan 30;77 .
- [۲۸] میر محمدی ع، الهیاری س. طراحی سیستم خنک‌کاری برای باتری لیتوم- یون در سرعت دشارژهای مختلف با مدل‌سازی الکتریکی- گرمایی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۵۱(۱):۴۶-۳۹، ۲۰۲۱.
- [۲۹] مولایی منش غ، موسوی خوشدل س، نعمتی ا. بررسی توزیع دما طی تست تنش دینامیکی بر روی سطح باتری لیتوم-یون بکار گرفته شده در یک خودروی هیبرید الکتریکی. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۲:۵۱۲-۵۱۷، ۱۴۹۷، ۲۰۱۹.
- [30] Moaveni A, Siavashi M, Mousavi S. Passive and hybrid battery thermal management system by cooling flow control, employing nano-PCM, fins, and metal foam. *Energy*. 2024 Feb 1;288 .
- [31] Ping P, Peng R, Kong D, Chen G, Wen J. Investigation on thermal management performance of PCM-fin structure for Li-ion battery module in high-temperature environment. *Energy Convers Manag*. 2018;176:131-46 .
- [32] NematpourKeshmeli A, Iasiello M, Langella G, Bianco N. Increasing melting and solidification performances of a phase change material-based flat plate solar collector equipped with metal foams, nanoparticles, and wavy wall-Y-shaped surface. *Energy Convers Manag* [Internet]. 2023;291:117268. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006143>
- [8] Lyu Y, Siddique ARM, Majid SH, Biglarbegian M, Gadsden SA, Mahmud S. Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*. 2019 Nov 1;5:822-7 .
- [9] Yang XH, Tan SC, Liu J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal. *Energy Convers Manag*. 2016 Jun 1;117:577-85 .
- [10] Akbarzadeh M, Jaguemont J, Kalogiannis T, Karimi D, He J, Jin L, et al. A novel liquid cooling plate concept for thermal management of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Convers Manag*. 2021 Mar 1;231:113862 .
- [11] Nasehi R, Alamatsaz A, Salimpour MR. Using multi-shell phase change materials layers for cooling a lithium-ion battery. *Thermal Science*. 2016;20(2):391-403 .
- [12] Chen J, Kang S, Jiaqiang E, Huang Z, Wei K, Zhang B, et al. Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries: A review. *J Power Sources*. 2019;442:227228 .
- [13] Lv Y, Situ W, Yang X, Zhang G, Wang Z. A novel nanosilica-enhanced phase change material with anti-leakage and anti-volume-changes properties for battery thermal management. *Energy Convers Manag*. 2018 May 1;163:250-9 .
- [14] Cao J, Luo M, Fang X, Ling Z, Zhang Z. Liquid cooling with phase change materials for cylindrical Li-ion batteries: An experimental and numerical study. *Energy* [Internet]. 2020; 191: 116565. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219322601>
- [15] Lv Y, Yang X, Zhang G. Durability of phase-change-material module and its relieving effect on battery deterioration during long-term cycles. *Appl Therm Eng*. 2020 Oct 1;179 .
- [16] Morali U. A numerical and statistical implementation of a thermal model for a lithium-ion battery. *Energy*. 2022 Feb 1;240 .
- [17] Mohammed AG, Wang Q, Elfeky KE. Rapid cooling effectiveness of Li-ion battery module with multiple phase change materials for plug-in hybrid electric vehicle. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023 Mar 1;185 .
- [18] Saxena V, Sharma A, Kothari R, Sahu SK, Kundalwal SI. Analysis of Li-ion battery under high discharge rate embedded with metal foam phase change composite: A numerical study. *J Energy Storage*. 2024 Apr 15;84 .
- [19] Bamdezh MA, Molaeimanesh GR. Impact of system structure on the performance of a hybrid thermal management system for a Li-ion battery module. *J Power Sources*. 2020 May 1;457 .
- [20] Moaveni A, Siavashi M, Mousavi S. Passive and hybrid battery thermal management system by cooling flow control, employing nano-PCM, fins, and metal foam. *Energy*. 2024 Feb 1;288 .
- [21] Fluent A. Ansys fluent theory guide. Ansys Inc, USA. 2011;15317:724-46 .
- [22] Kim GH, Smith K, Lee KJ, Santhanagopalan S, Pesaran A. Multi-Domain Modeling of Lithium-Ion Batteries Encompassing Multi-Physics in Varied Length Scales. *J Electrochem Soc*. 2011;158(8):A955 .
- [23] Bamdezh MA, Molaeimanesh GR, Zanganeh S. Role of foam anisotropy used in the phase-change composite material for the hybrid thermal management system of lithium-ion battery. *J Energy Storage*. 2020 Dec 1;32:101778 .