

بررسی عددی مدیریت گرمایی ترکیبی یک دسته باتری لیتیوم-یونی در حضور ماده تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل طی فرایند ذخیره و تخلیه

محمد تقیلو*
یاشار خرمی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، taghilou@znu.ac.ir
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، yashar.kh7646@gmail.com

چکیده

این مقاله به بررسی عددی مدیریت گرمایی یک دسته باتری لیتیوم-یون در حضور محیط متخلخل و مواد تغییر فاز دهنده طی فرایند ذخیره و تخلیه می‌پردازد. تأثیر تعداد سلول‌ها و اندازه کانال خنک‌کاری بر بیشینه دما، اختلاف دمای مدول‌ها و توان مورد نیاز جریان خنک‌کاری ارزیابی شده است. همچنین، کارایی روش‌های خنک‌کاری با هوا، ترکیب هوا و محیط متخلخل، و ترکیب هوا و مواد تغییر فاز دهنده مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سلول‌ها، بیشینه دما افزایش می‌یابد، اما با افزایش دبی جرمی جریان خنک‌کاری، بیشینه دما و اختلاف دمای مدول‌ها کاهش می‌یابد. با این حال، برای دبی جرمی $\dot{m}=0.0114 \text{ kg/s}$ و تخلخل $\phi=0.75$ ، با افزایش تعداد سلول‌ها از ۲ به ۱۰، ضریب کارایی محیط متخلخل از 53.12 به 0.37 کاهش می‌یابد. در خنک‌کاری با ترکیب هوا و ماده ان-اکتادکان، دمای بیشینه به میزان 4 K کمتر از خنک‌کاری با هوا در محیط متخلخل و 14.75 K کمتر از خنک‌کاری تنها با هوا به‌دست آمد. در نهایت، استفاده از ماده ان-ایکوسان به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده برای بهبود عملکرد گرمایی و کاهش اختلاف دما پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: باتری لیتیوم-یونی، مدیریت گرمایی باتری، ماده تغییر فاز دهنده، محیط متخلخل، جریان اجباری هوا، ذخیره و تخلیه.

Numerical investigation of hybrid thermal management of a lithium-ion battery pack in the presence of PCM and porous medium during charging and discharging processes

M. Taghilou
Y. Khorrami

Department of mechanical engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
Department of mechanical engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

This paper presents a numerical investigation of the thermal management of a lithium-ion battery pack in the presence of a porous medium and phase change materials during charging and discharging stages. The effects of the number of cells and the cooling channel size on the maximum temperature, module temperature difference, and required power for the cooling flow have been evaluated. Additionally, the efficiency of cooling methods using air, a combination of air and porous medium, and a combination of air and PCMs has been studied. The results show that as the number of cells increases, the maximum temperature rises; however, with an increase in the mass flow rate of the cooling flow, both the maximum temperature and module temperature difference decrease. Nevertheless, for a mass flow rate of $\dot{m}=0.0114 \text{ kg/s}$ and a porosity of 0.75 , as the number of cells increases from 2 to 10, the efficiency coefficient of the porous medium decreases from 53.12 to 0.37 . In cooling with a combination of air and n-octadecane, the maximum temperature was found to be 4 K lower than cooling with air in a porous medium and 14.75 K lower than cooling with air alone. Finally, the use of n-eicosane as a phase change material is proposed to enhance thermal performance and reduce temperature differences.

Keywords: Lithium-ion battery, battery thermal management, phase change material, porous medium, forced air flow, Charging and Discharging.

۱- مقدمه

جانبی ناخواسته مانند تشکیل لایه SEI^3 است [۱]. معمولاً تولید گرما در فرایند ذخیره به‌دلیل نرخ جریان بالا و شرایط نامناسب شارژ سریع، بیشتر است، اما در تخلیه نیز تحت بارگذاری سنگین می‌تواند قابل توجه باشد. دفع این گرما ضروری است، زیرا افزایش دما می‌تواند به پدیده‌های خطرناکی مانند فرار گرمایی^۴ منجر شود که ایمنی باتری را به مخاطره می‌اندازد و طول عمر آن را کاهش می‌دهد. همچنین، دماهای بالا باعث تخریب مواد داخلی باتری و کاهش ظرفیت قابل استفاده می‌شوند [۲]. برای مدیریت گرمایی باتری‌های لیتیوم-یونی، روش‌های مختلفی مانند خنک‌کننده‌های هوا، سیستم‌های خنک‌کننده

باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل چگالی انرژی بالا، طول عمر زیاد و سرعت خود تخلیه پایین، به طور گسترده در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از این باتری‌ها، مدیریت گرمایی آن‌ها است. در طول فرایند ذخیره^۱ و تخلیه^۲، باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل واکنش‌های الکتروشیمیایی و مقاومت داخلی، گرما تولید می‌کنند. این گرما ناشی از عواملی مانند پلاریزاسیون الکتروشیمیایی، تلفات گرمایی ناشی از مقاومت الکتریکی مواد تشکیل‌دهنده (الکترودها، الکترولیت و جداکننده)، و واکنش‌های

³ Solid Electrolyte Interphase

⁴ Thermal runaway

¹ Charging

² Discharging

مایع، استفاده از مواد فاز تغییردهنده^۱ (PCM)، فن‌ها و چاه‌های گرمایی برای افزایش انتقال گرما، و کنترل نرخ ذخیره و تخلیه به منظور کاهش تلفات گرمایی وجود دارد. انتخاب روش به نوع کاربرد، شرایط عملیاتی و محدودیت‌های اقتصادی بستگی دارد و این رویکردها علاوه بر بهبود عملکرد، ایمنی و طول عمر باتری را نیز افزایش می‌دهند [۳-۵].

فن و همکاران [۶] یک شبیه‌سازی سه‌بعدی از خنک‌کاری هوایی باتری لیتیوم-یونی ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که کاهش فاصله پره‌ها یا افزایش دبی هوا، حداکثر دما را کاهش می‌دهد. همچنین، فاصله متوسط پره‌ها برای توزیع دمای یکنواخت‌تر مناسب است. محمدیان و ژانگ [۷] با استفاده از پره‌های سوزنی، به بهینه‌سازی خنک‌کاری یک دسته باتری منشوری شکل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از پره‌هایی با ارتفاع متغیر، علاوه بر کاهش دمای بیشینه باتری، انحراف از استاندارد دمای داخلی باتری را نیز کاهش می‌دهد. کریمی و لی [۸] یک مدل دو بعدی برای محاسبه عددی توزیع دمای باتری لیتیوم-یونی منشوری ارائه کردند. آن‌ها از نتایج اینوی و همکاران [۹] برای برآورد نرخ تولید گرمای حجمی استفاده کردند. تحلیل‌ها نشان داد که خنک‌کاری مبتنی بر جابه‌جایی اجباری، یک روش کارآمد و مقرون‌به‌صرفه است که می‌تواند توزیع یکنواخت دما و ولتاژ را در دسته باتری در نرخ‌های مختلف تخلیه تضمین کند. شین و همکاران [۱۰] یک سیستم مدیریت گرمایی هیبریدی شامل خنک‌کننده هوا و خنک‌کننده مایع پیشنهاد کردند. نتایج نشان داد که با تنظیم دقیق پارامترهای طراحی، تعادل خوبی بین عملکرد خنک‌کننده، مصرف انرژی و وزن سبک به‌دست می‌آید، به‌طوری که حداکثر دما $34/41^{\circ}\text{C}$ و بیشینه اختلاف دما $1/53^{\circ}\text{C}$ کاهش یابد.

محمدیان و همکاران [۱۱] در یک مطالعه عددی، تأثیر استفاده از محیط متخلخل آلومینیومی در کانال خنک‌کاری هوایی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش متخلخل، هم انحراف از استاندارد میدان دما و هم حداکثر دمای باتری را کاهش می‌دهد. یانگ و همکاران [۱۲] به منظور بهبود عملکرد و ایمنی خودروهای برقی، مدیریت گرمایی باتری‌های لیتیوم-یونی را مطالعه کردند. با انجام ۱۹ شبیه‌سازی، آن‌ها موفق به شناسایی بهینه‌ترین موقعیت قرارگیری نواحی متخلخل در مینی‌کانال شدند. نتایج نشان داد که تنها با پر کردن ۱۰ درصد از حجم مینی‌کانال با بلوک‌های متخلخل، می‌توان به سطح کارایی خنک‌کنندگی مشابه دست یافت، که این امر می‌تواند هزینه‌ها و مصرف انرژی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد.

وانگ و همکاران [۱۳] ظرفیت PCM برای مدیریت گرمایی باتری‌های لیتیوم-یونی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که PCM ها با خواص ترموفیزیکی متفاوت می‌توانند مسائل گرمایی را به‌طور مؤثر مدیریت کنند. به‌طوری که RT35 در دمای محیط 20°C یا 30°C و RT50 در دمای محیط 40°C بهترین عملکرد را دارند زارع و همکاران [۱۴] یک سیستم مدیریت گرمایی باتری مبتنی بر PCM ارائه کردند که از پره‌های داخلی و خارجی برای ایجاد مخازن PCM در اطراف سطح باتری استفاده می‌کند. این سیستم با استفاده از مدل گرمایی ویژه

فشرده و روش آنتالپی-تخلخل تحلیل و عملکرد آن تحت نرخ‌های مختلف تخلیه و دماهای محیط بررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم مدیریت گرمایی با ۴ پره داخلی-خارجی، دمای سطح باتری را در نرخ تخلیه ۳ به میزان $9/9\text{ K}$ کاهش می‌دهد و عملکرد بهتری نسبت به سیستم خنک‌کننده PCM بدون پره دارد. نظر و همکاران [۱۵] با انجام آزمایش‌های ذخیره و تخلیه روی بسته‌های باتری، تأثیر مدیریت گرمایی بر عملکرد باتری را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که استفاده از خنک‌کاری فعال (خنک‌کننده هوا) اختلاف دما را 6°C کاهش می‌دهد، در حالی که خنک‌کننده غیرفعال (استفاده از PCM) آن را به $3/5^{\circ}\text{C}$ کاهش می‌دهد.

بای و همکاران [۱۶] در مقاله‌ای به بررسی خنک‌کاری توسط PCM و جریان آب خنک پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در طی ۵ فرایند تخلیه و ذخیره، قرار دادن صفحه خنک‌کننده آب در نزدیکی ناحیه الکترود باتری، باعث کاهش حداکثر دما می‌شود. همچنین، قرار دادن PCM در بین باتری‌های مجاور می‌تواند یکنواختی میدان دما را بهبود بخشد. کائو و همکاران [۱۷] به ایجاد توزیع دمای یکنواخت در یک دسته باتری بزرگ در حین تخلیه با نرخ تخلیه بالا و دبی سیال کم پرداختند. از آنجا که استفاده از جریان سیال با دمای کم می‌تواند توزیع دمای غیریکنواختی در باتری ایجاد کند، آن‌ها یک فرآیند خنک‌کاری دو مرحله‌ای پیشنهاد کردند. در این روش، ابتدا گرمای تولیدشده توسط باتری توسط PCM جذب می‌شود و پس از رسیدن دمای بیشینه باتری به دمای ذوب PCM، جریان آب خنک‌کاری را ادامه می‌دهد.

موسوی و همکاران [۱۸] یک سیستم خنک‌کننده هیبریدی جدید برای باتری‌های خودروهای الکتریکی پیشنهاد کردند که ترکیبی از PCM و خنک‌کننده مایع است. این سیستم شامل چهار سلول باتری است که به‌عنوان یک مازول در نظر گرفته می‌شود و بین صفحات سرد مینی‌کانال عمودی و صفحات افقی PCM قرار می‌گیرند. نتایج عددی نشان داد که این سیستم دمای بیشینه را به ترتیب $5/6\text{ K}$ و $16/2\text{ K}$ در نرخ‌های تخلیه 2°C و 3°C کاهش می‌دهد و اختلاف دما را در نرخ تخلیه 3°C تا 33°C درصد در مقایسه با کارهای قبلی کاهش می‌دهد. لینگ و همکاران [۱۹] با ترکیب جابه‌جایی اجباری جریان هوا و PCM، یک روش ترکیبی ارائه کردند که موفق به کنترل دمای بیشینه و یکنواخت‌سازی توزیع دمای باتری شدند. آن‌ها نشان دادند که در یک سیستم ترکیبی، PCM نقش مهمی در کنترل دمای بیشینه و یکنواخت‌سازی توزیع دما دارد، در حالی که جابه‌جایی اجباری در بازیابی گرمای ویژه PCM اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

کوشکی و رحمانیان [۲۰]، از PCM و ترکیب آن با فوم مس برای خنک‌کاری باتری لیتیوم-یونی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این مواد باعث کاهش قابل توجهی در دمای باتری می‌شوند. همچنین، استفاده از فوم مسی زمان جامد شدن ماده تغییر فاز دهنده را کاهش و کارایی سامانه مدیریت گرمایی را افزایش می‌دهد. میرمحمدی و الهیاری [۲۱]، به مدل‌سازی الکتریکی و حرارتی یک باتری لیتیوم-یونی پرداخته و افزایش دما در هنگام تخلیه را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در نرخ جریان بالا، دمای باتری به میزانی می‌رسد که می‌تواند به آن آسیب برساند. برای رفع این مشکل، سیستم خنک‌کاری با جریان آب طراحی شد که دمای باتری را در محدوده ایمن قرار داد.

¹ Phase change material (PCM)

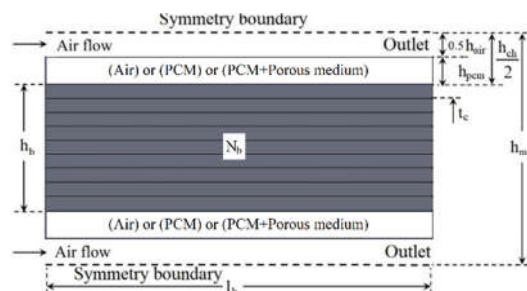
محیط متخلخل، PCM، با ترکیب این دو پیش‌بینی نشده است. با توجه به شکل ۲، مشخص است که جریان هوا و نیز فضای اختصاص داده شده به محیط متخلخل و PCM در میان مدول‌ها قرار دارند و سلول‌ها بدون واسطه به یکدیگر متصل هستند. تعداد سلول‌های باتری در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی حاضر ۲، ۶، ۸ و ۱۰ می‌باشد. هدف اصلی، کنترل دمای بیشینه و ایجاد توزیع دمای یکنواخت در باتری و نیز امکان چینش هرچه متراکم‌تر سلول‌ها به منظور افزایش تراکم تولید توان در واحد حجم، است. از این رو، در تمام محاسبات انجام شده، ارتفاع مدول، $h_m = 44 \text{ mm}$ ثابت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ارتفاع کانال خنک‌کننده h_{ch} ارتباط مستقیمی با تعداد سلول‌های باتری N_b خواهد داشت:

$$h_{ch} = h_m - (N_b \times t_c) - 2t_{h_{PCM}} \quad (1)$$

در معادله (۱) ضخامت هر سلول و h_{PCM} ضخامت PCM است. در صورت استفاده از PCM برای خنک‌کاری، مقدار ضریب τ یک و در صورت عدم حضور PCM، مقدار این ضریب صفر خواهد بود. بر این اساس، حداقل ارتفاع در نظر گرفته شده برای باتری $h_b = 8 \text{ mm}$ است که در این حالت ارتفاع کانال خنک‌کاری $h_{ch} = 36 \text{ mm}$ است (بدون در نظر گرفتن PCM). حداکثر ارتفاع در نظر گرفته شده برای باتری نیز $h_{ch} = 40 \text{ mm}$ است که در این حالت ارتفاع کانال خنک‌کاری $h_{ch} = 4 \text{ mm}$ خواهد بود.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی باتری، آلومینیوم و مواد تغییر فاز دهنده [۲۲-۲۴].

ماده	چگالی، $\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	گرمای ویژه، $(\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$ C_p	رسانایی گرمایی، $k \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$
باتری	۲۱۲۲	۹۳۳	۲۱
آلومینیوم	۲۷۱۹	۸۷۱	۲۰۲/۴
ان-اکتادکان	۷۷۷	۲۶۶۰	۰/۱۴۹
ان-ایکوسان	۷۷۰	۲۴۶۰	۰/۳۹
ماده	گرمای نهان، $h_f \text{ (J.kg}^{-1}\text{)}$	دمای انجماد، $T_s \text{ (K)}$	دمای ذوب، $T_l \text{ (K)}$
ان-اکتادکان	۲۴۱۳۶۰	۳۰۰	۳۰۱
ان-ایکوسان	۲۴۷۶۰۰	۳۰۸	۳۱۰



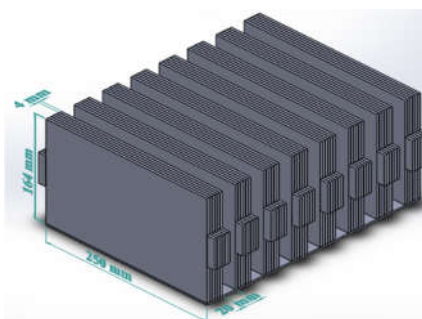
شکل ۲- طرحواره هندسی یک مدول از باتری لیتیوم-یونی متشکل از کانال‌های خنک‌کاری و سلول‌های باتری

عملکرد باتری به صورت چهار فرایند تخلیه و ذخیره متوالی به‌گونه‌ای تعریف شده است که هر فرایند ابتدا با تخلیه آغاز و سپس با

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که استفاده از محیط متخلخل، مواد تغییر فاز دهنده و جریان بهینه هوا، نتایج امیدوارکننده‌ای در کاهش حداکثر دما و دستیابی به توزیع یکنواخت دما ارائه می‌دهد. با این حال، تحقیقات کافی در زمینه روش‌های خنک‌کاری ترکیبی برای این نوع باتری‌ها وجود ندارد. هدف این مطالعه، پر کردن این شکاف با بررسی عددی مدیریت گرمایی فعال و غیرفعال یک مجموعه باتری لیتیوم-یونی منشوری است که از محیط متخلخل و مواد تغییر فاز دهنده بهره می‌برد. این مطالعه شامل ماژول‌هایی با تعداد سلول‌های مختلف است که امکان ایجاد چهار پیکربندی مجزا با تعداد سلول‌های ۲، ۶، ۸ و ۱۰ را فراهم می‌کند. بررسی تأثیر تعداد سلول‌های باتری و اندازه کانال خنک‌کننده بر دمای بیشینه باتری، بیشینه اختلاف دما و نیز توان مورد نیاز برای ایجاد جریان خنک‌کننده، از جمله نوآوری‌های این پژوهش به شمار می‌رود. علاوه بر این، کارایی روش‌های مختلف خنک‌کاری نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و تحلیل شده است.

۲- مدل فیزیکی

در مقاله حاضر، یک دسته باتری لیتیوم-یونی منشوری، متشکل از تعدادی مدول، مطابق شکل ۱ بررسی می‌شود. در این شکل، ۴۸ سلول در ۸ مدول ۶ تایی در کنار هم قرار گرفته‌اند. همچنین، گرمای تولید شده در سلول‌ها، توسط جریان هوای عبوری از فاصله میان مدول‌ها، دفع می‌شود. هر سلول با ظرفیت اسمی ۵/۵ Ah، ولتاژ اسمی ۳/۳ V و جریان ۴۴ A دارای ابعاد $250 \times 164 \times 4 \text{ mm}^3$ می‌باشد [۲۲، ۲۳] که خواص ترموفیزیکی آن در جدول ۱، ذکر شده است.



شکل ۱- طرحواره سه بعدی از مجموعه باتری لیتیوم-یونی متشکل از ۴۸ سلول در ۸ مدول ۶ سلولی.

به منظور کاهش حجم محاسبات، و به دلیل آن‌که جریان خنک‌کاری در راستای طول باتری ($l_b = 250 \text{ mm}$)، وارد می‌شود، مسئله به صورت دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود؛ به‌طوری‌که از تغییرات تمامی متغیرها در راستای عمق باتری ($w_b = 164 \text{ mm}$)، صرف‌نظر می‌گردد. همچنین، به جای مجموعه چندتایی از مدول‌ها، تنها یک مدول متشکل از تعدادی سلول و کانال خنک‌کاری مطابق شکل ۲ انتخاب می‌شود. در این شکل، فضایی که با ارتفاع $h_{ch}/2$ مشخص شده است، می‌تواند تنها جریان هوا را به‌صورت مستقل در خود جای دهد یا شامل محیط متخلخل، PCM، یا ترکیبی از محیط متخلخل و PCM در بخشی از این فضا باشد. لازم به ذکر است که در شکل ۱، تنها جریان هوای عبوری از میان مدول‌ها نشان داده شده و شرایط استفاده از

ذخیره ادامه یابد. مدت زمان هر فرآیند (s) ۲۲۵ در نظر گرفته شده است، به طوریکه در مجموع (s) ۴۵۰ برای هر تخلیه و ذخیره متوالی و (s) ۱۸۰۰ برای کل فرآیند، در نظر گرفته می شود. خواص ترموفیزیکی محیط متخلخل (آلومینیوم)، ان-اکتادکان^۱ و ان-ایکوسان^۲ در جدول ۱ آورده شده است. در استخراج و حل معادلات حاکم، فرضیات زیر در تمامی شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است:

۱- جریان هوا، لایه ای و تراکم ناپذیر است.
۲- از جریان همرفت طبیعی درون فاز مایع PCM، صرف نظر شده است.

۳- خواص ترموفیزیکی هوا، باتری و ماده تغییر فازدهنده ثابت و یکنواخت است.

۴- محیط متخلخل به صورت همسانگرد با مقدار تخلخل و نفوذپذیری ثابت در نظر گرفته شده است.

۵- بیشترین میزان ذخیره باتری ۷۵٪ و کمترین میزان آن، ۲۵٪ است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان هوا درون محیط متخلخل با اعمال فرضیات مسئله، به قرار زیر است:

۳-۱- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_f \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

در معادله (۲)، ρ_f تخلخل، $\mathbf{v}$ چگالی سیال و v سرعت ظاهری^۳ یا سرعت دارسی است. رابطه میان سرعت واقعی یا ذاتی^۴ جریان، $\mathbf{V}$ و سرعت دارسی از طریق رابطه زیر داده می شود [۲۵]:

$$\mathbf{v} = \phi \mathbf{V} \quad (3)$$

۳-۲- معادلات بقای تکانه

برای اعمال اثرات محیط متخلخل به معادله تکانه، رابطه زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

$$\mathbf{v} = \mu^{-1} K \nabla p \quad (4)$$

معادله (۴) به قانون دارسی معروف است. در این رابطه μ لزجت دینامیکی سیال و ∇p گرادیان فشار جریان است. K ضریب نفوذپذیری و پارامتری مستقل از جریان سیال، ولی وابسته به هندسه محیط متخلخل است. مطابق معادله دارسی، گرادیان فشار با سرعت دارسی رابطه خطی دارد و تا زمانی معتبر است که سرعت v به اندازه کافی کوچک باشد. "به اندازه کافی کوچک بودن" به این منظور است که عدد رینولدز Re_p که بر مبنای قطره حفره ها بدست می آید از مرتبه یک باشد. با افزایش سرعت، علاوه بر ضریب پسی لزجت، اثر پسی شکل نیز قابل ملاحظه می شود و به این ترتیب معادله (۴) به شکل معادله دارسی-فورچیمر اصلاح می شود:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} \mathbf{v} - c_F K^{1/2} \rho_f |\mathbf{v}| \mathbf{v} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، c_F ضریب پسی شکل بی بعد است که به صورت زیر قابل برآورد می باشد [۲۶]:

$$c_F = \frac{1.75}{\sqrt{150}} \phi^{-\frac{3}{2}} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن نیروهای ناشی از محیط متخلخل به شکل معادله (۵) و اصلاح مقادیر سرعت فیزیکی به کمک رابطه (۳)، معادلات بقای تکانه برای جریان درون محیط متخلخل به صورت زیر استخراج می شوند [۲۷]:

$$\rho_f \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \nabla \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{\phi} \right) \right] = -\nabla p + \frac{\mu}{\phi} \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} - \frac{c_F \rho_f}{K^{1/2}} |\mathbf{v}| \mathbf{v} \quad (7)$$

۳-۳- معادلات بقای انرژی

با فرض خواص ثابت و یکنواخت، معادله انرژی برای باتری لیتیوم-یونی به صورت زیر نوشته می شود [۲۸]:

$$(\rho c_p)_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \left[\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} \right] + \dot{q}_b \quad (8)$$

در معادله بالا، $\dot{q}_b$ آهنگ تولید گرمای داخلی باتری است که از رابطه زیر بدست می آید [۲۲]:

$$\dot{q}_b = I^2 R_{int} + I T \frac{\partial U}{\partial T} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، I جریان الکتریکی، R_{int} مقاومت الکتریکی داخلی، T دمای باتری، U تلفات پتانسیل سلولی^۵ و $\partial U / \partial T$ ضریب آنتروپی است. اولین عبارت در سمت راست معادله (۹) به دلیل مقاومت الکتریکی باتری است و جمله برگشت ناپذیر محسوب می شود. جمله دوم به عنوان یک جمله برگشت پذیر بوده و به دلیل تغییر در آنتروپی باتری است (تغییر آنتروپی به دلیل واکنش). در این مقاله، مقدار جریان الکتریکی I در فرآیند تخلیه منفی و در فرآیند ذخیره، مثبت فرض شده است. مقادیر مقاومت داخلی و ضرایب آنتروپی در فرایندهای ذخیره و تخلیه برای نرخ تخلیه ΔC را می توان با استفاده از روابط مرجع [۲۹، ۲۲] تخمین زد. همچنین، نرخ تخلیه باتری C ، با جریان الکتریکی و ظرفیت باتری C_b مرتبط می شود، $C = I / C_b$ [۳۰].

معادله انرژی برای جریان هوا درون محیط متخلخل با فرض شرط تعادل دمای محلی به صورت زیر خواهد بود [۵۵، ۱۰]:

$$(\rho c_p)_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left[k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right] \quad (10)$$

در رابطه بالا، k_{eff} و $(\rho c_p)_{eff}$ به ترتیب رسانایی گرمایی معادل و گرمای ویژه معادل می باشند که توسط روابط زیر محاسبه می شوند:

$$k_{eff} = (1 - \phi) k_s + \phi k_f \quad (11)$$

$$(\rho c_p)_{eff} = (1 - \phi) (\rho c_p)_s + \phi (\rho c_p)_f \quad (12)$$

در صورت اعمال فرض عدم تعادل دمای محلی، معادله (۱۰) به دو معادله مجزا از هم تفکیک خواهد شد:

¹ n-Octadecane

² n-Eicosane

³ Superficial velocity

⁴ Intrinsic velocity

⁵ Cell overpotential

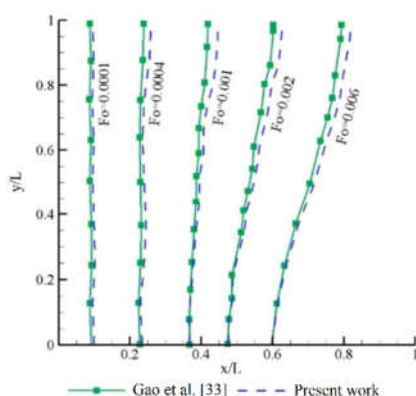
$$\left\{ \begin{array}{ll} \beta=0 & ; T < T_s \\ \beta = \frac{T-T_s}{T_f-T_s} & ; T_s < T < T_f \\ \beta=1 & ; T > T_f \end{array} \right. \quad (24)$$

۴-۳- حل عددی معادلات حاکم

برای ترسیم هندسه و شبکه‌بندی از نرم افزار Gambit و برای حل عددی معادلات حاکم، از نرم افزار ۲۰۱۶ Ansys Fluent استفاده شده است. الگوریتم SIMPLE برای جفت کردن معادلات سرعت و فشار، روش استاندارد برای گسسته‌سازی معادلات فشار و روش مرتبه دوم برای گسسته سازی معادلات تکانه و انرژی انتخاب شده است. از آنجایی که مسئله فوق یک مسئله ناپایا است، حل معادلات حاکم مستلزم اعمال شرایط اولیه است. برای این منظور دمای اولیه باتری و محیط متخلخل ۲۹۸ K در نظر گرفته می‌شود. در صورت وجود PCM در مسئله، دمای اولیه انتخاب شده به معنای فاز جامد اولیه برای PCM خواهد بود. در مرزهای بالا و پایین، مطابق شکل ۲، شرط مرزی تقارن اعمال شده است. همچنین از شرط مرزی سرعت در ورودی و شرط فشار صفر در خروجی کانال، استفاده شده است.

۴- صحت‌سنجی

اولین مرحله صحت‌سنجی به مطالعه فرآیند ذوب PCM درون یک حفره مربعی شکل، حاوی محیط متخلخل می‌پردازد. برای انجام این کار، مسئله حل شده توسط گائو و همکاران [۲۳] به همراه شرط عدم تعادل دمای محلی، انتخاب شده است. شکل ۳ موقعیت جبهه ذوب بین شبیه‌سازی فعلی و داده‌های موجود [۲۳] را برای شرایط $h_f = 5/9$ نشان می‌دهد. مطابق شکل، بین نتایج کار حاضر و داده‌های گائو و همکاران در قسمت پایین محفظه تطابق مناسبی وجود دارد. اما، در قسمت بالایی محفظه، جایی که اثرات همرفت طبیعی افزایش می‌یابد، این تطابق تضعیف می‌شود. با این وجود، حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی انجام شده و داده‌های موجود به $6/8$ درصد می‌رسد، که عملکرد قابل قبول شبیه‌سازی انجام شده در پیش‌بینی کسر مایع درون محیط متخلخل با فرض عدم تعادل دمای محلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت جبهه ذوب در زمان‌های مختلف بین کار حاضر و نتایج گائو و همکاران [۲۳]

$$\phi(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \phi \left[k_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) \right] + h_v (T_s - T_f) \quad (13)$$

$$(1-\phi)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\phi) \left[k_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \right] + h_v (T_f - T_s) \quad (14)$$

معادلات (۱۳) و (۱۴) شامل یک جمله اضافی نسبت به معادلات با فرض تعادل دمای محلی می‌باشند که بیانگر انتقال گرما بین دو فاز سیال و متخلخل است. h_v ضریب انتقال گرما حجمی بین دو فاز است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_v = h_{fs} a_{fs} \quad (15)$$

در این رابطه a_{fs} بیانگر سطح بر واحد حجم محیط متخلخل است [۲۵]:

$$a_{fs} = 6(1-\phi)/d_p \quad (16)$$

همچنین ضریب انتقال گرما همرفت بین سیال و محیط متخلخل، h_{fs} را می‌توان از میان برازش‌های موجود تخمین زد [۲۵]:

$$\frac{1}{h_{fs}} = \frac{d_p}{Nu_{fs} k_f} + \frac{d_p}{\eta k_s} \quad (17)$$

در معادله بالا، d_p قطر ذره و $\eta=10$ (نسبت مجموع حجم سوراخ‌ها به حجم کل محیط متخلخل) برای حالتی است که ذرات به شکل کروی باشند. برای رینولدزهای بیشتر از ۱۰۰، عدد Nu_{fs} توسط رابطه هندلی و هگز با داشتن عدد پرانتل و رینولدز بدست می‌آید [۳۱]:

$$Nu_{fs} = (0.255/\phi) Pr^{1/3} Re_p^{2/3} \quad (18)$$

برای اعداد رینولدز کمتر از ۱۰۰، مقدار Nu_{fs} بین ۰/۱ تا ۱۲/۴ تغییر می‌کند. به عنوان جایگزین می‌توان از معادله ارائه شده در معادله (۱۹) بهره برد:

$$Nu_{fs} = 2 + 1.1 Pr^{1/3} Re_p^{0.6} \left(\frac{\phi d_p}{d_h} \right)^{0.6} \quad (19)$$

در معادله (۱۹) عدد بی بعد رینولدز Re_p با قطر ذره d_p ، سرعت متوسط U و لزجت سینماتیکی ν به صورت $Re_p = U d_p / \nu$ بدست می‌آید. در صورت عدم حضور محیط متخلخل در جریان هوا، کافی است در معادله (۱۰) به جای خواص معادل، خواص هوا قرار داده شود. معادله انرژی برای ماده تغییر فاز دهنده با فرض عدم حضور همرفت طبیعی درون فاز مایع، به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۲]:

$$\rho_{pcm} \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} \right) = k_{pcm} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (20)$$

در معادله بالا، k_{pcm} رسانایی گرمایی PCM و H آنتالپی کل است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۲]:

$$H = h_s + \Delta H \quad (21)$$

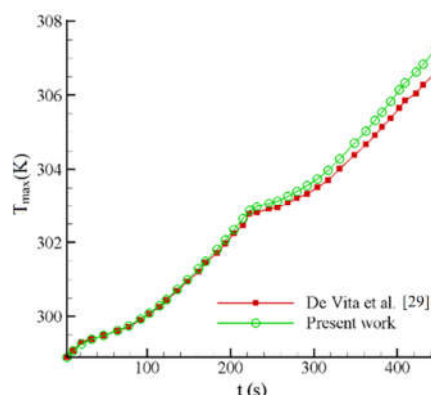
در معادله (۲۱)، h_s آنتالپی محسوس و ΔH آنتالپی نهان است که به ترتیب از معادلات (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند [۵۹]:

$$h_s = h_{s,ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (22)$$

$$\Delta H = \beta h_l \quad (23)$$

h_l گرمای نهان ذوب و β مقدار کسر مایع است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۲]:

گام بعدی صحت‌سنجی، تأیید نتایج خنک‌کاری اجباری است. برای این کار از نتایج عددی دویتا و همکاران [۲۹] استفاده شده است. در این مقاله، خنک‌کاری ۸ مدول، حاوی ۶ سلول باتری لیتیوم-یونی با جریان اجباری هوا مطابق صورت پذیرفته است. شکل ۴ تغییرات دمای بیشینه باتری را برحسب زمان در دو مرحله تخلیه و ذخیره باتری نشان می‌دهد. با توجه به آنکه حداکثر اختلاف میان نتایج کار حاضر و نتایج دویتا و همکاران کمتر از ۰/۲۱ درصد است و چشمه گرمایی مورد استفاده در کار حاضر منطبق بر مقاله مذکور است؛ بنابراین، صحت شبیه‌سازی انجام شده در حالت همرفت اجباری تأیید می‌گردد. محاسبات این قسمت با گام زمانی $\Delta t=1$ (s) و تعداد شبکه ۴۴۰۰۰ به عنوان شبکه مورد نظر برای تمامی حالت‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- تغییرات بیشینه دمای باتری در دو مرحله تخلیه و ذخیره میان نتایج کار حاضر و نتایج عددی دویتا و همکاران [۲۹]

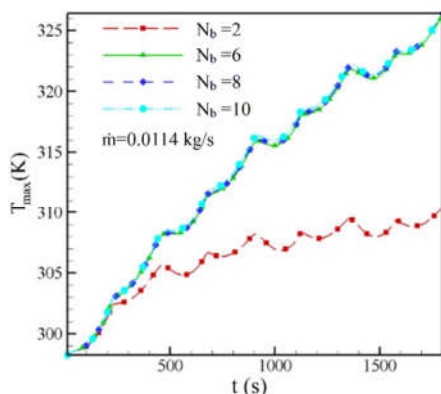
۴-۱- خنک‌کاری با جریان هوا

این بخش به بررسی شرایط خنک‌کاری باتری در حضور جریان اجباری در کانال ساده (بدون محیط متخلخل و بدون PCM) می‌پردازد. کمیت‌های کلیدی مورد مطالعه شامل دمای بیشینه باتری (T_{max})، اختلاف دمای بیشینه در هر مدول (ΔT) و توان مورد نیاز برای ایجاد دبی مطلوب (P) هستند. مطابق شکل ۲، مجموع ارتفاع کانال خنک‌کاری و یک مدول باتری برابر با ۴۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بنابراین، با افزایش تعداد سلول‌ها (N_b)، تراکم سلول‌ها در واحد حجم باتری افزایش می‌یابد. علاوه بر پارامتر N_b ، دبی جریان هوا نیز به‌عنوان یک متغیر مستقل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور بررسی تأثیر تراکم سلول در مجموعه باتری، چهار مقدار مختلف برای تعداد سلول‌ها (N_b) در نظر گرفته شده است: ۲، ۶، ۸ و ۱۰. به‌عنوان حالت پایه، از دبی جرمی $\dot{m}=0.0114$ kg/s در هر مدول استفاده شده است که عدد رینولدز جریان درون کانال برای این حالت برابر با ۶۳۷ است. شکل ۵، تغییرات دمای بیشینه باتری را بر حسب زمان برای چهار مقدار مختلف N_b نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، در حالت $N_b=2$ ، دمای بیشینه باتری پس از گذشت چهار مرحله کامل تخلیه و ذخیره به مقدار ۳۱۰/۴ K رسیده است. پایین بودن دمای بیشینه در این حالت را می‌توان به ضخامت کمتر مدول و کاهش میزان گرمای تولیدشده نسبت داد.

از طرف دیگر، با افزایش تعداد سلول‌های باتری و کاهش سطح

عبور هوا در کانال که منجر به افزایش سرعت جریان می‌شود، نه تنها دمای باتری کاهش نمی‌یابد، بلکه به دلیل افزایش گرمای تولیدشده در مدول، دمای بیشینه نیز افزایش می‌یابد. تقابل این دو اثر برای سه حالت $N_b=6$ ، $N_b=8$ و $N_b=10$ به‌گونه‌ای است که تغییرات دمای بیشینه در این موارد تقریباً مشابه یکدیگر است. در نهایت، در شرایط دبی جرمی $\dot{m}=0.0114$ kg/s، دمای بیشینه باتری به مقدار ۳۲۶/۴ K می‌رسد.



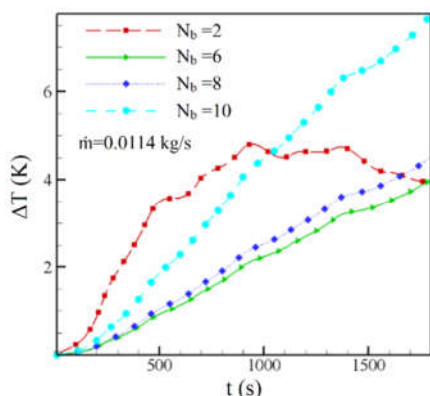
شکل ۵- تغییرات بیشینه دمای باتری به ازای تعداد سلول‌های مختلف در دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s)

با افزایش دبی جرمی به $\dot{m}=0.0228$ kg/s و افزایش سرعت جریان در کانال (عدد رینولدز جریان درون کانال برای این حالت برابر با ۱۲۷۴ است)، دمای بیشینه باتری در همه حالات نسبت به دبی $\dot{m}=0.0114$ kg/s کاهش می‌یابد. بر اساس شکل ۶، کمترین دمای بیشینه پس از اتمام کامل چرخه‌های تخلیه و ذخیره در حالت $N_b=2$ به ۳۰۸/۸K و بیشترین مقدار آن در حالت $N_b=6$ به ۳۲۲/۳ K رسیده است.

مقایسه دو شکل ۵ و شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی، شرایط خنک‌کاری در حالت $N_b=10$ دچار تغییر شده است. به عبارت دیگر، دمای بیشینه در حالت $N_b=10$ نسبت به حالت $N_b=6$ و $N_b=8$ کاهش یافته است. این موضوع برخلاف شرایط دبی $\dot{m}=0.0114$ kg/s است که در آن افزایش خنک‌کاری ناشی از افزایش سرعت جریان هوا، با افزایش تولید گرما متوازن می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش دبی خنک‌کاری به $\dot{m}=0.0228$ kg/s و همچنین افزایش تعداد سلول‌ها به $N_b=10$ ، تقویت خنک‌کاری به دلیل افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی، بر اثرات افزایش گرمای تولیدی غلبه کرده است.

تغییرات شار گرما (q'') در فصل مشترک باتری و کانال در شکل ۷ رسم شده است. بر اساس این شکل، با افزایش دبی جرمی هوا، شار گرما در سمت چپ باتری کاهش و در سمت راست آن افزایش می‌یابد. از آنجا که بیشینه دمای باتری در انتهای کانال رخ می‌دهد (شکل ۸)، افزایش شار گرما در سمت راست باتری که با افزایش دبی جرمی رخ می‌دهد، سبب کاهش دمای بیشینه شده است.

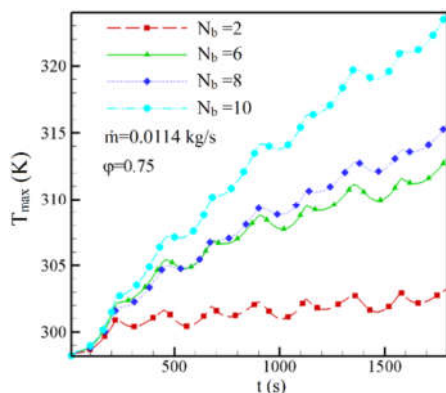
با افزایش مجدد دبی جرمی هوا به مقدار $\dot{m}=0.0456$ kg/s (عدد رینولدز جریان درون کانال برای این حالت برابر با ۲۵۴۸ است)، الگوی تغییرات دمای بیشینه همچنان مشابه حالت دبی $\dot{m}=0.0228$ kg/s است و دمای بیشینه باتری در همه حالات کاهش می‌یابد. به طوری که



شکل ۹- تغییرات اختلاف دمای باتری به ازای تعداد سلول‌های مختلف در دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s)

۴-۲- خنک‌کاری جریان هوا در حضور محیط متخلخل

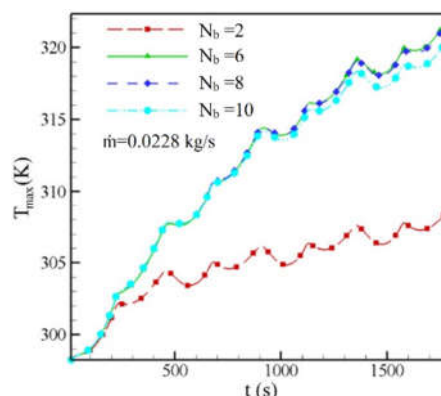
در این مطالعه، از فوم آلومینیوم به‌عنوان محیط متخلخل در شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل ۱۰، تغییرات دمای بیشینه باتری بر حسب زمان را برای تعداد سلول‌های مختلف در دبی جرمی $\dot{m}=0.0114$ kg/s و تخلخل ۷۵ درصد نشان می‌دهد.



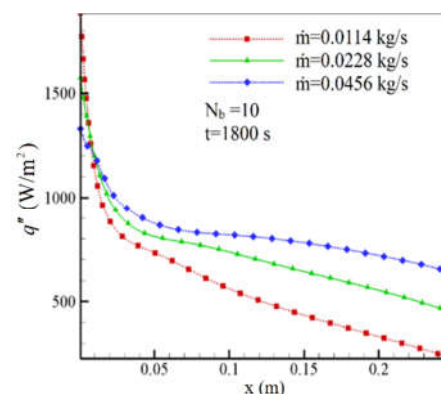
شکل ۱۰- تغییرات بیشینه دمای باتری به ازای تعداد سلول‌های مختلف در دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s) و تخلخل ۰/۷۵

بر اساس این شکل، دمای بیشینه در حالت $N_b=2$ پس از گذشت چهار مرحله کامل تخلیه و ذخیره به $303/26$ K رسیده است. این مقدار نسبت به حالت خنک‌کاری با هوا و بدون حضور محیط متخلخل، $7/14$ K کاهش نشان می‌دهد. در حالی که برای حالات $N_b=6$ و $N_b=8$ ، دمای بیشینه باتری به ترتیب برابر با $313/1$ K و $315/6$ K است که نسبت به حالت بدون محیط متخلخل به ترتیب ترتیب $13/1$ K و $10/8$ کاهش یافته است. در حالت $N_b=10$ ، دمای بیشینه برابر با 324 K است که نسبت به حالت بدون محیط متخلخل تنها $2/3$ K کاهش داشته و کمترین تغییرات را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان به کوچک بودن فضای قرارگیری محیط متخلخل در این حالت نسبت داد. از نظر حجم فضای قرارگیری محیط متخلخل، حالت $N_b=2$ بهترین شرایط را دارد. اما از آنجا که در این حالت گرمای تولیدشده در مدول کمترین میزان است، استفاده از محیط متخلخل در این حالت بیشترین تأثیر را نخواهد داشت. با توجه به این توضیحات، بیشترین

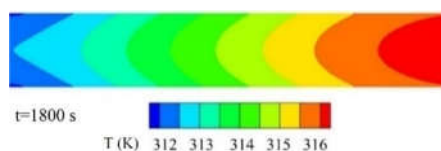
بیشینه دما برای $N_b=10$ به $316/3$ K می‌رسد (برای رعایت اختصار، از آوردن شکل مربوطه صرف‌نظر شده است). تغییرات اختلاف دمای بیشینه (ΔT) برای چهار ضخامت مختلف مدول و دبی جرمی $\dot{m}=0.0114$ kg/s در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که حداقل اختلاف دمای بیشینه درون باتری از $3/98$ K برای حالت $N_b=2$ تا $7/76$ K در حالت $N_b=10$ متغیر است. با افزایش دبی جرمی به $\dot{m}=0.0228$ kg/s، کمترین اختلاف دمای بیشینه به $1/95$ و بیشینه مقدار آن به $6/06$ K کاهش می‌یابد. الگوی مشابهی از تغییرات با افزایش دبی جرمی به $\dot{m}=0.0456$ kg/s مشاهده می‌شود؛ به طوری که حداقل اختلاف دما به $1/78$ K و حداکثر مقدار آن به $4/31$ K می‌رسد (برای رعایت اختصار، از آوردن شکل‌های مربوطه صرف‌نظر شده است).



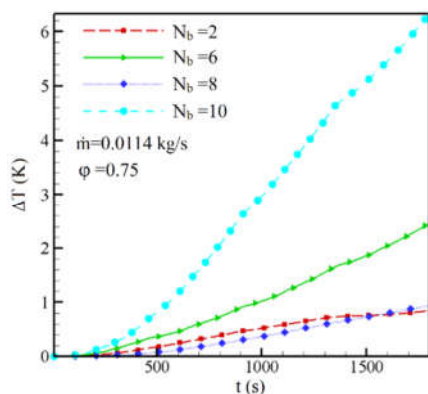
شکل ۶- بیشینه دمای باتری به ازای تعداد سلول‌های مختلف در دبی جرمی ۰/۰۲۲۸ (kg/s)



شکل ۷- تغییرات شار گرما در فصل مشترک باتری و کانال خنک‌کاری به ازای تعداد سلول ۱۰ و زمان ۱۸۰۰ (s)



شکل ۸- کانتور دمای باتری به ازای ۰/۰۲۲۸ (kg/s)، تعداد سلول ۱۰ و زمان ۱۸۰۰ (s)

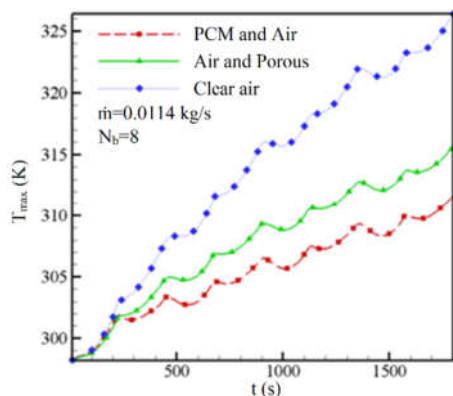


شکل ۱۱- تغییرات اختلاف دمای بیشینه باتری در تعداد سلول‌های مختلف به ازای دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s) و تخلخل ۰/۷۵

۳-۴- خنک‌کاری با ترکیب PCM و هوا

در این بخش، به بررسی خنک‌کاری باتری با ترکیب جریان هوا و PCM پرداخته می‌شود (شکل ۲ را مشاهده کنید). بر اساس این شکل، ارتفاع کانال خنک‌کاری برای هوا ۴ میلی‌متر و برای PCM، ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تمام محاسبات این بخش، دبی جرمی هوا برابر با $\dot{m}=0.0114 \text{ kg/s}$ و تعداد سلول‌ها برابر با ۸ در نظر گرفته شده است. همچنین، از آن-کتادکان به‌عنوان PCM استفاده شده است.

طبق شکل ۱۲، در حالت ترکیب PCM و جریان هوا (برای دبی جرمی $\dot{m}=0.0114 \text{ kg/s}$ و تعداد سلول ۸)، بیشینه دمای باتری به میزان ۴ کلون کمتر از حالت خنک‌کاری با جریان هوا همراه با محیط متخلخل و ۱۴/۷۵ کلون کمتر از حالت خنک‌کاری تنها با جریان هوا است.



شکل ۱۲- تغییرات بیشینه دمای باتری در حالت‌های مختلف خنک‌کاری به ازای تعداد سلول ۸ و دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s)

طبق شکل ۱۳، قبل از لحظه ۱۳۵۰ ثانیه، بیشینه اختلاف دما درون باتری برای حالت ترکیب PCM با جریان هوا و ترکیب محیط متخلخل با جریان هوا، نزدیک به هم و کمتر از ۱ کلون است. با این حال، پس از ۱۳۵۰ ثانیه، اختلاف دمای بیشینه در حالت ترکیب PCM با جریان هوا افزایش می‌یابد. بر اساس شکل ۱۴، در لحظه ۱۳۵۰ ثانیه، اولین نقطه در فصل مشترک PCM و کانال هوا (که در شکل با علامت دایره نشان داده شده است) به مایع تبدیل می‌شود. تا پیش از این

تأثیر حضور محیط متخلخل در حالت $N_b=6$ مشاهده می‌شود. استفاده از محیط متخلخل باعث کاهش بیشینه دمای باتری می‌شود؛ اما از سوی دیگر، حضور این محیط موجب افزایش افت فشار جریان و در نتیجه افزایش توان مورد نیاز برای پمپاژ سیال خنک‌کننده نیز می‌شود. در جدول ۲، توان مورد نیاز برای ایجاد دبی جرمی $\dot{m}=0.0114 \text{ kg/s}$ در تخلخل ۷۵ درصد، به ازای تعداد سلول‌های مختلف در دو حالت حضور و عدم حضور محیط متخلخل گزارش شده است. در این جدول، زیرنویس "p" نشان‌دهنده حضور محیط متخلخل است. پارامتر η نیز کارایی استفاده از محیط متخلخل را در بهبود خنک‌کاری، در مقایسه با افزایش افت فشار، بیان می‌کند.

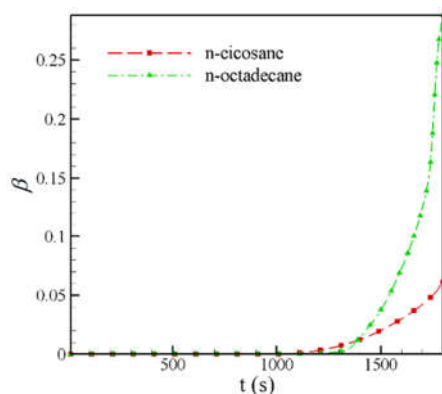
$$\eta = \frac{\dot{m}_a c_{p,a} (T_{\max} - T_{\max,p})}{P_p - P} \quad (25)$$

جدول ۲- توان مورد نیاز برای پمپاژ هوا و دمای بیشینه باتری در حالت حضور و عدم حضور محیط متخلخل در خنک‌کاری با هوا در دبی جرمی ۰/۰۱۱۴ (kg/s) و تخلخل ۰/۷۵

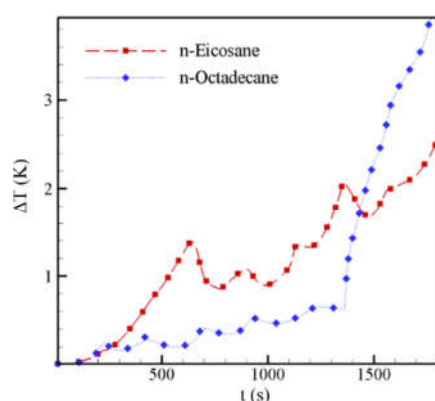
η	P_p (W)	$T_{\max,p}$ (K)	P (W)	$T_{\max}$ (K)	N_b
۵۳/۱۲	۱/۵۶۵	۳۰۳/۲۶۶	۰/۰۳	۳۱۰/۳۸۴	۲
۳۵/۲۱	۴/۳۰۶	۳۱۳/۱۰۲	۰/۰۴۸	۳۲۶/۱۹	۶
۱۲/۳۳	۱۰۰/۵۶	۳۱۵/۶۴۲	۰/۰۶	۳۲۶/۴۰۲	۸
۰/۳۷	۷۳،۳۱۹	۳۲۳/۹۸۴	۱/۰۷	۳۲۶/۳۳	۱۰

طبق جدول ۲، با افزایش تعداد سلول‌ها و رشد تصاعدی افت فشار درون کانال، ضریب کارایی محیط متخلخل کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش تعداد سلول‌ها از ۲ به ۱۰، ضریب η از ۵۳/۱۵ به ۰/۳۷ کاهش پیدا می‌کند. نتایج جدول ۲ به وضوح نشان می‌دهد که با متراکم‌تر شدن طراحی باتری، افت فشار لازم برای ایجاد جریان خنک‌کاری به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. بنابراین، بهتر است شرایط میانی انتخاب شود؛ یعنی حالتی که باتری تراکم مناسبی داشته باشد و همزمان افت فشار زیادی ایجاد نکند (دو حالت $N_b=6$ و $N_b=8$). نکته قابل توجه این است که دمای بیشینه در حالت $N_b=6$ و $N_b=8$ اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. علاوه بر این، با افزایش تخلخل از ۰/۷۵ به ۰/۸۵ و ۰/۹۵، دمای بیشینه تغییر قابل توجهی نمی‌کند؛ به‌طوری‌که در حالت $N_b=10$ ، دمای بیشینه باتری با تغییر تخلخل از ۰/۷۵ به ۰/۹۵ تنها حدود ۱ کلون افزایش می‌یابد.

بررسی تغییرات اختلاف دمای بیشینه برای تخلخل‌های ۰/۷۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل، بیشینه اختلاف دما (که نشان‌دهنده میزان یکنواختی توزیع دمای باتری است) حدود ۲ کلون افزایش می‌یابد. شکل ۱۱، تغییرات بیشینه اختلاف دمای باتری را برای تخلخل ۰/۷۵ نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که اختلاف دمای بیشینه در حالت $N_b=2$ و $N_b=8$ اختلاف جزئی با یکدیگر دارند (بویژه برای ۰/۷۵ و $\phi=0.85$)، حتی در حالت $\phi=0.95$ ، تراکم سلولی $N_b=8$ اختلاف دمای کمتری نسبت به $N_b=2$ ایجاد می‌کند. بنابراین، در ادامه، $N_b=8$ به‌عنوان حالت نهایی برای بررسی‌های بعدی انتخاب می‌شود. (از آنجا که الگوی تغییرات دمای بیشینه برای تخلخل‌های ۰/۸۵ و ۰/۹۵ مشابه تخلخل ۰/۷۵ است، از ترسیم شکل‌های مربوطه صرف‌نظر شده است.)



شکل ۱۵- تغییرات کسر مایع سطحی با زمان برای ان-اکتادکان و ان-ایکوسان



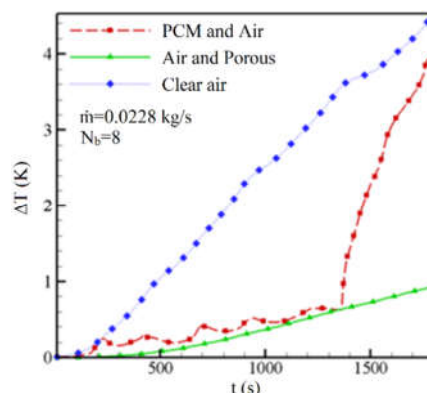
شکل ۱۶- تغییرات اختلاف دمای بیشینه باتری با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ان-اکتادکان و ان-ایکوسان

۵- نتیجه گیری

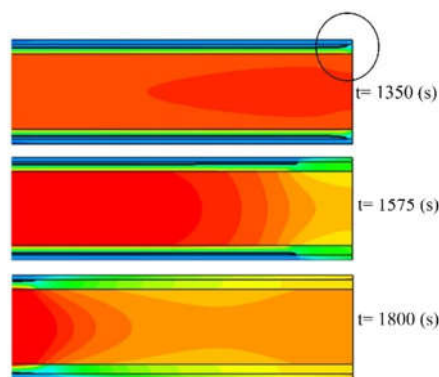
در این مقاله، به بررسی عددی مدیریت گرمایی فعال و غیرفعال یک دسته باتری لیتیوم-یونی منشوری در حضور PCM و جریان هوا تقویت شده با محیط متخلخل در طی فرایند ذخیره و تخلیه متوالی پرداخته شد. پارامترهای طراحی شامل تعداد سلول‌های باتری و فضای کانال خنک‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، تغییرات دمای بیشینه باتری، اختلاف دمای بیشینه و کمینه، کانتور دمای باتری، تغییرات کسر مایع با زمان، میزان تخلخل و دبی جرمی جریان هوا نیز مطالعه شدند. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- در روش خنک‌کاری با هوا، کمترین دمای بیشینه باتری در حالت استفاده از ۲ سلول مشاهده می‌شود. برای سایر تعداد سلول‌ها (۶، ۸ و ۱۰)، اختلاف دمای بیشینه باتری تقریباً مشابه است. با افزایش دبی جرمی در حالت $N_b=10$ ، اختلاف دمای بیشینه باتری کمتر از حالات $N_b=6$ و $N_b=8$ است.
- وجود محیط متخلخل در کاهش دمای بیشینه مؤثر است؛ اما متراکم‌سازی سلول‌های باتری موجب افزایش قابل‌توجه توان مورد نیاز برای پمپاژ سیال خنک‌کننده و کاهش ضریب کارایی محیط متخلخل می‌شود. بنابراین، استفاده از تعداد سلول‌هایی که تراکم مناسبی داشته و افت فشار زیادی ایجاد نمی‌کنند ($N_b=8$ و $N_b=6$) توصیه می‌شود. با توجه به اینکه اختلاف دمای بیشینه و کمینه در

لحظه، گرمای تولیدشده در باتری به صورت گرمای نهان در PCM ذخیره می‌شود؛ اما پس از آن، بخشی از گرمای تولیدی از طریق PCM مایع به جریان خنک‌کننده هوا منتقل می‌شود. این انتقال گرما سبب کاهش سریع دما در سمت راست باتری و افزایش شدید اختلاف دمای بیشینه درون باتری می‌شود. این موضوع در شکل ۱۳ به وضوح مشاهده می‌شود، زیرا شیب تغییرات اختلاف دمای بیشینه در این لحظه به‌صورت ناگهانی تغییر می‌کند.



شکل ۱۳- تغییرات اختلاف دمای بیشینه باتری در حالت‌های مختلف خنک‌کاری به ازای تعداد سلول ۸ و دبی جرمی 0.0228 (kg/s)



شکل ۱۴- کانتور دمای باتری در خنک‌کاری با ترکیب PCM و هوا در زمان‌های مختلف

برای بهبود مشکل افزایش اختلاف دمای بیشینه درون باتری در شرایط استفاده از ان-اکتادکان همراه با جریان هوا، می‌توان از ماده‌ای با گرمای نهان ذوب بزرگ‌تر نسبت به ان-اکتادکان استفاده کرد. این انتخاب باعث می‌شود که PCM موجود در فصل مشترک PCM و کانال هوا، در مدت زمان طولانی‌تری ذوب شود. بر این اساس، ان-ایکوسان با مشخصات ترموفیزیکی ارائه‌شده در جدول ۱ انتخاب شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، سطح PCM چسبیده به کانال هوا در این حالت زمان بیشتری برای رسیدن به ذوب کامل نسبت به ان-اکتادکان نیاز دارد. این موضوع سبب کاهش اختلاف دمای بیشینه درون باتری می‌شود. صحت این ادعا در شکل ۱۶ به وضوح دیده می‌شود. بر اساس این شکل، استفاده از ان-ایکوسان از ایجاد اختلاف دمای زیاد و ناگهانی درون باتری جلوگیری کرده است.

حالت $N_b=8$ حتی کمتر از حالت $N_b=2$ است، تعداد ۸ سلول باتری به عنوان حالتی با بهترین کارایی انتخاب شد.

• استفاده از خنک کاری ترکیبی باتری با جریان هوا و مواد تغییر فاز دهنده بیشترین تأثیر را بر کاهش دمای بیشینه باتری دارد.

۶- مراجع

- [18] Mousavi S, Zadehkabir A, Siavashi M, Yang X. An improved hybrid thermal management system for prismatic Li-ion batteries integrated with mini-channel and phase change materials. *Applied Energy*. 2023;334:120643.
- [19] Ling Z, Wang F, Fang X, Gao X, Zhang Z. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling. *Applied energy*. 2015;148:403-9.
- [۲۰] کوشکی ح، رحمانیان س. بررسی عددی مدیریت گرمایی باتری لیتیوم-یون با استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۳. د. ۵۴. ش. ۱۰۸. ص. ۱۲۳-۱۳۲.
- [۲۱] میر محمدی ع، الهیاری س. طراحی سیستم خنک کاری برای باتری لیتوم-یون در نرخ دشارژهای مختلف با مدل سازی الکتریکی-حرارتی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰. د. ۵۱. ش. ۹۴. ص. ۲۳۹-۲۴۶.
- [22] Taghilou M, Mohammadi MS. Thermal management of lithium-ion battery in the presence of phase change material with nanoparticles considering thermal contact resistance. *Journal of Energy Storage*. 2022;56:106029.
- [23] Buonomo B, Manca O, Ercole D, Nardini S. Numerical simulation of thermal energy storage with phase change material and aluminum foam. 2016.
- [24] Abdi A, Ignatowicz M, Gunasekara SN, Chiu JN, Martin V. Experimental investigation of thermo-physical properties of n-octadecane and n-eicosane. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;161:120285.
- [25] Nield DA, Bejan A. Convection in porous media: Springer; 2006.
- [26] Lee JS, Ogawa K. Pressure drop through packed bed. *Journal of chemical engineering of Japan*. 1994;27(5):691-3.
- [27] Joseph DD, Nield DA, Papanicolaou G. Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium. *Water Resources Research*. 1982;18(4):1049-52.
- [28] Buonomo B, Ercole D, Manca O, Menale F. Thermal cooling behaviors of lithium-ion batteries by metal foam with phase change materials. *Energy Procedia*. 2018;148:1175-82.
- [29] De Vita A, Maheshwari A, Destro M, Santarelli M, Carello M. Transient thermal analysis of a lithium-ion battery pack comparing different cooling solutions for automotive applications. *Applied Energy*. 2017;206:101-12.
- [30] Thirugnanam K, TP ERJ, Singh M, Kumar P. Mathematical modeling of Li-ion battery using genetic algorithm approach for V2G applications. *IEEE transactions on Energy conversion*. 2014;29(2):332-43.
- [31] Handly D. Momentum and heat transfer mechanisms in regular shaped packings. *Trans Inst Chem Eng*. 1968;46:251-9.
- [32] Mousavi S, Siavashi M, Zadehkabir A. A new design for hybrid cooling of Li-ion battery pack utilizing PCM and mini channel cold plates. *Applied Thermal Engineering*. 2021;197:117398.
- [33] Gao D, Tian F-B, Chen Z, Zhang D. An improved lattice Boltzmann method for solid-liquid phase change in porous media under local thermal non-equilibrium conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;110:58-62.
- [1] Arora P, Zhang Z. Battery separators. *Chemical reviews*. 2004;104(10):4419-62.
- [2] Bandhauer TM, Garimella S, Fuller TF. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the electrochemical society*. 2011;158(3):R1.
- [3] Zhao L, Tong J, Zheng M, Chen M, Li W. Experimental study on the thermal management performance of immersion cooling for 18650 lithium-ion battery module. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;192:634-42.
- [4] Chen Z, Yang S, Pan M, Xu J. Experimental investigation on thermal management of lithium-ion battery with roll bond liquid cooling plate. *Applied Thermal Engineering*. 2022;206:118106.
- [5] Lin J, Liu X, Li S, Zhang C, Yang S. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;167:120834.
- [6] Fan L, Khodadadi J, Pesaran A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013;238:301-12.
- [7] Mohammadian SK, Zhang Y. Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2015;273:431-9.
- [8] Karimi G, Li X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*. 2013;37(1):13-24.
- [9] Inui Y, Kobayashi Y, Watanabe Y, Watase Y, Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Conversion and Management*. 2007;48(7):2103-9.
- [10] Xin S, Wang C, Xi H. Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2023;224:120100.
- [11] Mohammadian SK, Rassoulinejad-Mousavi SM, Zhang Y. Thermal management improvement of an air-cooled high-power lithium-ion battery by embedding metal foam. *Journal of Power Sources*. 2015;296:305-13.
- [12] Yang M, Mathew G, Nemat H, Moghimi M. A novel approach for active cooling of a battery at cell level: Air-cooled mini-channel heat sink, enhanced with intermittent metal foam. *Journal of Energy Storage*. 2024;81:110374.
- [13] Wang H, Guo Y, Ren Y, Yeboah S, Wang J, Long F, et al. Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*. 2024;236:121590.
- [14] Zare P, Perera N, Lahr J, Hasan R. A novel thermal management system for cylindrical lithium-ion batteries using internal-external fin-enhanced phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2024;238:121985.
- [15] Nazar MW, Iqbal N, Ali M, Nazir H, Amjad MZB. Thermal management of Li-ion battery by using active and passive cooling method. *Journal of Energy Storage*. 2023;61:106800.
- [16] Bai F, Chen M, Song W, Feng Z, Li Y, Ding Y. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:17-27.
- [17] Cao J, Ling Z, Fang X, Zhang Z. Delayed liquid cooling strategy with phase change material to achieve high temperature uniformity of Li-ion battery under high-rate discharge. *Journal of Power Sources*. 2020;450:227673.