

مدل سازی عددی سیستم کنترل دمایی باتری لیتیوم یون در دمای اولیه ی پایین

پدرام شمسی زاده، ابراهیم افشاری*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

کلمات کلیدی:

باتری لیتیوم یون
مدیریت دما
آب و هوای سرد
دمای عملیاتی
آرایش جریان

خلاصه: دمای باتری لیتیوم یون تأثیر چشمگیری بر عملکرد آن دارد و حفظ دمای باتری در دمای عملیاتی مناسب بسیار مهم است؛ به طوری که علاوه بر تأثیر بر عملکرد، امنیت و عمر بیشتر باتری را نیز تضمین می کند. در این مقاله، عملکرد یک سیستم کنترل دمای باتری لیتیوم یون با مجموعه‌ی ۶ سل در شرایط آب و هوایی سرد (دمای اولیه 20°C) بررسی شده است. اختلاف دمای حداکثر و دمای میانگین باتری‌ها به عنوان معیارهای سنجش عملکرد سیستم کنترل دما در نظر گرفته شده و اثرات دبی، تعداد صفحات و آرایش جریان سیال ورودی شامل روش ساده، جریان مخالف و جریان مخالف زیگزاگ روی این دو مشخصه و بر زمان گرم شدن باتری بررسی شده است. با افزایش دبی سیال ورودی، باتری‌ها سریع‌تر به دمای عملکردی 20°C می‌رسند و اختلاف دما کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد صفحات در دبی ثابت، سرعت گرمایش در دبی‌های بالا سریع‌تر خواهد شد. آرایش جریان مخالف زیگزاگ شکل، عملکرد بهتری از سایر موارد برای شاخص اختلاف دما دارد و تا ۸ برابر اختلاف دما را کاهش داده و به $2/1$ درجه سلسیوس در حالت حداکثری می‌رساند؛ اما سرعت گرمایش باتری در تمامی حالات جریان مخالف کندتر از آرایش جریان سیال ساده است.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از باتری‌ها به علت کاربرد وسیع آن در دستگاه‌های قابل حمل مانند تلفن‌های همراه، رایانه‌های قابل حمل و خودروهای برقی به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱]. باتری‌ها منبع اصلی انرژی در این قبیل وسایل هستند و بر عملکرد آن‌ها تأثیر مستقیم دارند. در بین باتری‌های رایج، نوع لیتیوم یون پرکاربردتر است؛ به دلیل این که دارای چگالی توان، عمر و بازده بالاتری هستند. همچنین، نرخ خود تخلیه شونده^۱ ناچیز و اثر حافظه‌ی^۲ باتری که موجب کاهش ذخیره‌ی انرژی می‌شود؛ در این نوع باتری از سایر باتری‌ها کمتر است [۲ و ۳]. با این وجود دمای باتری‌های لیتیوم یون تأثیر مستقیمی بر عملکرد آن‌ها دارد و کنترل دمای آنها در محدوده‌ی مناسب امری مهم است. محدوده‌ی مناسب دمای عملیاتی باتری‌های لیتیوم یون بین 20°C و 40°C درجه‌ی سلسیوس بیان شده است [۴-۷]. در دماهای پایین‌تر از 20°C درجه سلسیوس به دلیل افزایش لزجت الکترولیت و مقاومت

- 1 Self-discharge
- 2 Memory effect

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.afshari@eng.ui.ac.ir



نیز به دلیل گرمایش باتری‌ها، استفاده از روش‌های کنترل دمایی مرسوم است. نکته‌ی قابل توجه در طراحی سیستم‌های کنترل دمای باتری توجه به توزیع یکنواخت دما در باتری است. حداکثر اختلاف دمای مجاز در یک سلول باتری ۵ درجه است و اختلاف دمای بیش از این مقدار منجر به واکنش‌های الکتروشیمیایی غیر یکنواخت در باتری می‌شود. این مساله نیز شاهدهی بر اهمیت سیستم‌های کنترل دمای باتری می‌باشد [۱۵]. چن و همکاران [۱۶] یک سیستم کنترل دمای باتری را برای یک مجموعه‌ی ۲۴ عددی از باتری‌های لیتیوم یون بهینه‌سازی کردند که منجر به کاهش ۴ درجه‌ای دمای کلی باتری‌ها و ۶۹ درصدی اختلاف دما در آن‌ها شد.

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در کار جیلته و همکاران [۱۷] برای هدفی مشابه بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد چنانچه دمای اولیه‌ی باتری‌ها ۳۰ درجه سلسیوس باشد؛ افزایش کلی دمای آن‌ها در حالت تخلیه بیش از ۵ درجه نخواهد بود. در این تحقیق علاوه بر مواد تغییر فاز دهنده از نانوسیال نیز به منظور بهبود بیشتر عملکرد استفاده شده بود. مقایسه‌ی بین نانوذره‌ها نیز نشان داده است که Al_2O_3 عملکرد حرارتی بهتری نسبت به سایر نانوذره‌ها داشته است. به طور کلی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده نسبت به سایر روش‌های رایج بهتر است. تحقیق مشابه دیگری، نشان داده است که با پارافین به عنوان یک ماده‌ی تغییر فاز دهنده و گرافیت گسترش یافته می‌توان اختلاف دمای باتری را در نرخ تخلیه‌ی C_5 حفظ کرد. گرافیت گسترش یافته می‌تواند تا ۱۵۰ برابر نسبت به حجم اولیه‌اش افزایش حجم داشته باشد. افزایش بیش از حد حجم می‌تواند کاهش بازده حرارتی را در بر داشته باشد؛ زیرا منجر به افزایش فضای خالی و کاهش ضریب هدایت حرارتی کلی سیستم خواهد داشت [۲۱-۱۸]. تماس مستقیم سیال با باتری‌ها نیز توسط محققین بررسی شده است. پتیل و همکاران [۲۲] اثر تماس مستقیم سیال با یک مجموعه‌ی ۵۰ ولتی باتری را بررسی کردند و نشان دادند که با تماس مستقیم می‌توان تا ۹/۳ درصد دمای باتری‌ها را نسبت به روش تماس غیر مستقیم کاهش داد. همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش فواصل بین باتری‌ها، عملکرد سیستم کنترل دما افزایش بیشتری خواهد داشت. ژانگ و همکاران [۲۳] با استفاده از لوله‌های غیر فلزی در اطراف باتری‌ها نشان دادند که در همه‌ی دبی‌های سیال خنک کننده، دمای نهایی باتری‌ها به یک مقدار مشابه خواهد رسید و می‌توان تا ۴۵ درصد دمای باتری‌ها را با این روش کاهش داد. عموماً میزان دمای نهایی باتری تأثیر چندانی از دبی سیال نمی‌پذیرد؛ اما اختلاف دما در باتری شدیداً به این امر وابسته است. همچنین، توزیع دما در باتری‌های لیتیوم یون

در حالت تخلیه معمولاً غیر یکنواخت است. بنابراین برخی از تحقیقات بر ساختمان سیستم کنترل دمایی تمرکز دارند تا بتوانند اختلاف دما را تا حد ممکن کاهش دهند و توزیع دما را یکنواخت‌تر کنند [۶ و ۱۳ و ۲۵-۲۳]. در این راستا، کریمی و لی [۲۶] با شبیه‌سازی اثر خنک‌کنندگی سیال خنک‌کن در وضعیت‌های جابجایی طبیعی و اجباری، به این نتیجه رسیدند که جابجایی طبیعی منجر به توزیع یکنواخت دما نمی‌شود و برای دستیابی به این امر استفاده از روش جابجایی اجباری امری ضروری است. تحقیق دیگری نیز توسط فن و همکاران [۲۷] در شرایط کاملاً متفاوت با تحقیقات پیشین انجام شده است. در این تحقیق از سیستم کنترل دمای صفحه‌ای به منظور گرمایش باتری‌ها استفاده شده و نشان داده شده است که با سیستم طراحی شده، زمان گرمایش باتری (زمانی که دمای باتری به ۲۰ درجه‌ی سلسیوس برسد) ارتباط چندانی با دبی سیال نخواهد داشت؛ اما با افزایش دبی سیال، اختلاف دما در صفحات بالایی باتری کاهش می‌یابد. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهند که تغییر آرایش جریان نسبت به افزایش دبی، تأثیر بیشتری بر انتقال حرارت دارد [۲۸ و ۲۹].

بر اساس مطالعات انجام شده؛ باتری‌ها در بعضی از شرایط دمایی نیاز به گرمایش و در بعضی از شرایط نیاز به خنک‌کاری دارند [۳۰]. بر اساس مطالعات انجام شده که در بالا به برخی از آنها اشاره شد، تحقیق روی خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم یون بیشتر مورد توجه بوده است و به گرمایش این باتری‌ها در دماهای پایین (برای قرارگیری باتری‌ها در محدوده‌ی دمایی مناسب) کمتر توجه شده است. در این تحقیق برای اولین بار، مدل‌سازی عددی گرمایش ۶ باتری لیتیوم یون در دمای اولیه‌ی ۲۰- درجه‌ی سلسیوس با استفاده از صفحات گرم‌کن انجام شده است. هدف این تحقیق جلوگیری از کاهش عملکرد باتری لیتیوم یون در دماهای بسیار پایین و یکنواخت کردن توزیع دما در داخل باتری‌ها است. برای این منظور یک مدل سه بعدی توسط نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت ساخته شده است و اثر تعداد صفحات گرم‌کن و دبی سیال ورودی به کمک آرایش‌های جریان ورودی ساده، جریان مخالف و جریان زیگزاگ بر دمای میانگین و اختلاف دما بررسی شده است. بین باتری‌ها و صفحات خنک کننده نیز از خمیر سیلیکون به منظور کاهنده مقاومت تماسی استفاده شده است.

۲- مدل عددی

۲-۱- ساختار مدل

سیستم‌های معمول گرمایش / سرمایش صفحه‌ای برای باتری‌های لیتیوم یون معمولاً از یک صفحه با تعدادی کانال برای عبور سیال استفاده

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

که در آن μ لزجت سیال و P فشار است.

۲-۲-۳- بقای انرژی

به علت ۴ ناحیه‌ای بودن مسئله، معادله انرژی برای هر ناحیه به صورت جداگانه بیان شده است [۳۰].

(الف) بقای انرژی در سیال گرم کن

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c c_{pc} T_c) + \nabla \cdot (\rho_c c_{pc} \vec{v} T_c) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) \quad (3)$$

که T_c دما، k_c ضریب هدایت حرارتی و c_{pc} ظرفیت گرمایی ویژه‌ی سیال می‌باشد.

(ب) بقای انرژی در صفحه‌ی کنترل دما

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h c_{ph} T_h) = \nabla \cdot (k_h \nabla T_h) \quad (4)$$

که T_h ، k_h و c_{ph} به ترتیب دما، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی صفحه است.

(ج) بقای انرژی در خمیر سیلیکون

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s c_{ps} T_s) = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (5)$$

که T_s ، k_s و c_{ps} به ترتیب دما، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خمیر سیلیکون است.

(د) بقای انرژی در باتری‌ها

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_b c_{pb} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + q_g \quad (6)$$

که T_b ، k_b و c_{pb} به ترتیب دما، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی سلول باتری است و q_g کل تولید حرارت در باتری است که

می‌کنند. در این تحقیق، یک مدل سه بعدی شامل ۶ باتری با ۳ صفحه‌ی گرم کننده آلومینیومی با ضخامت ۳ میلی‌متر برای گرمایش باتری‌های مذکور توسط نرم افزار فلونت ایجاد و بررسی شده است. باتری‌ها به صورت ۳ ستونه و ۲ ردیفه نصب شده‌اند و ولتاژ کل آن‌ها ۲۴ ولت است. هر صفحه‌ی گرم کن شامل ۱۲ کانال مستطیلی عبور سیال می‌باشد که کانال‌ها به سمت باتری‌ها متمایل شده‌اند. طول هر کانال ۱۲ میلی‌متر و عرض آن نیز ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. بین هر صفحه و سلول‌های لیتیوم یون لایه‌ی خمیر سیلیکونی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است.

سه آرایش شامل آرایش جریان ساده، جریان مخالف و جریان مخالف زیگزاگ برای جریان ورودی در نظر گرفته شده است. تفاوت جریان مخالف و جریان مخالف زیگزاگ در نحوه‌ی ورودی سیال به صفحه‌ی گرم کن میانی است که در آرایش جریان زیگزاگ ترتیب جریان ورودی و خروجی تغییر کرده است. شکل ۱ نشان دهنده‌ی سلول لیتیوم یون و مجموعه‌ی نهایی باتری در آرایش جریان‌های مختلف می‌باشد. همچنین، ابعاد هندسه‌ی باتری ایجاد شده در جدول ۱ بیان شده است. از ترکیب ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال استفاده شده است. خواص مواد استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۲-۲- معادلات حاکم

مساله در شرایط گذرا حل شده است. جریان عبوری از کانال، جریان آرام (رینولدز کمتر از ۲۳۰۰) و تک‌فاز می‌باشد. معادلات حاکم غیر خطی بوده و شامل سه معادله‌ی بقای جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشد. در این مساله عملکرد الکتروشیمیایی باتری مد نظر نبوده است و تنها به بررسی رفتار دمایی باتری پرداخته شده است.

۲-۲-۱- بقای جرم

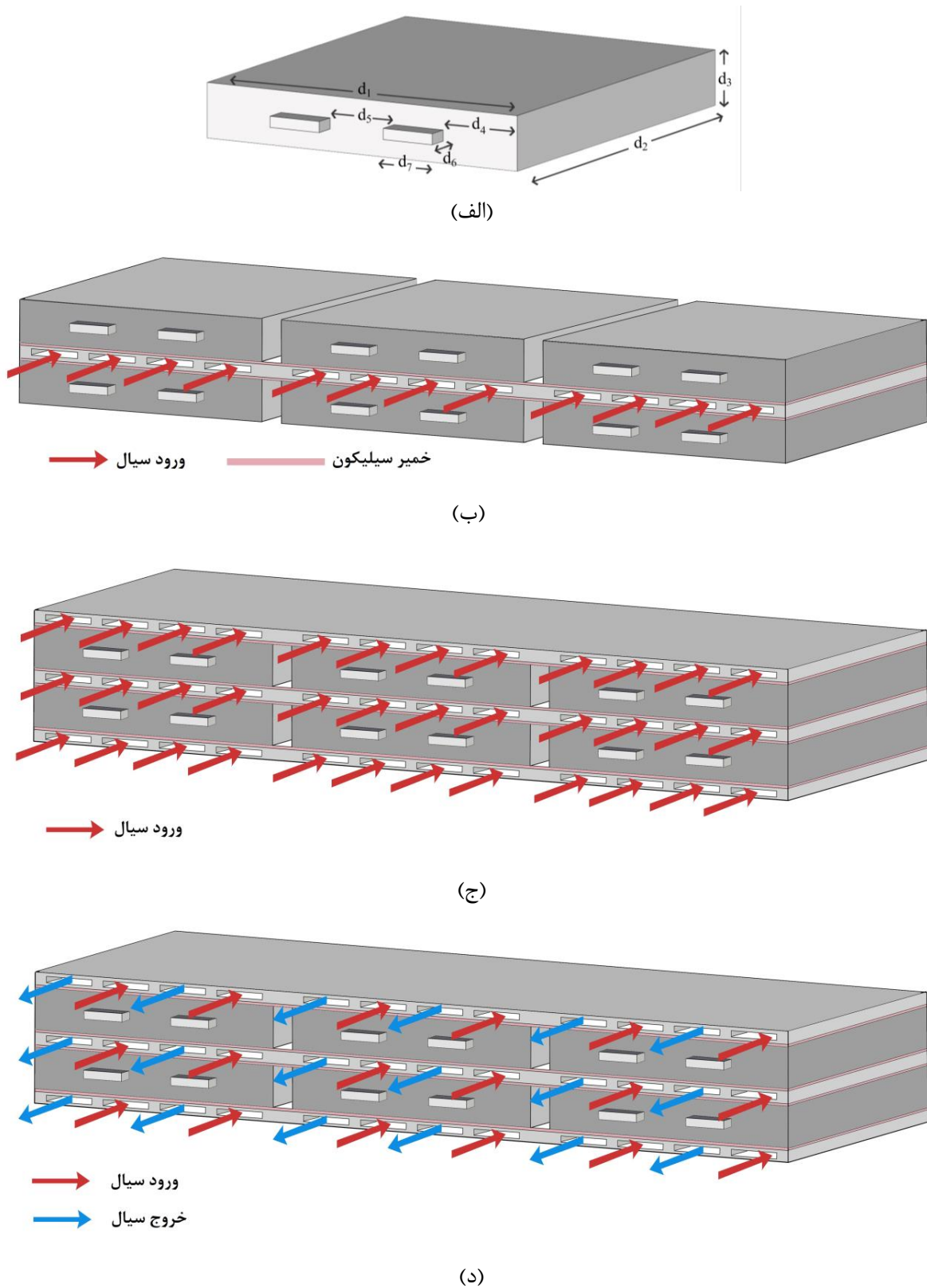
به منظور حصول اطمینان از بقای جرم، معادله‌ی بقای جرم به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۰].

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

که ρ_c چگالی سیال و \vec{v} سرعت سیال گرم کن است.

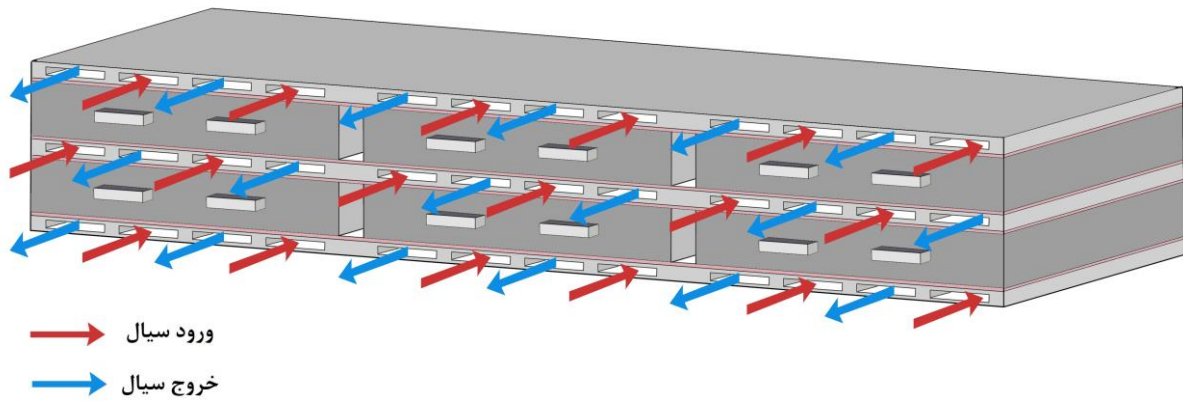
۲-۲-۲- بقای مومنتوم

معادله‌ی بقای مومنتوم به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۰].



شکل ۱. الف) تک سلول لیتیوم یون، ب) با گرم کن تک صفحه‌ای، ج) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان ساده، د) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان مخالف و ه) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان مخالف زیگزاگ (ادامه دارد)

Fig. 1. a) Single cell li-ion, b) with a single heater plate, c) with three parallel flow heating plates, d) with three counter flow heating plates and e) with three zig-zag flow heating plates. (Continue)



(ه)

شکل ۱. الف) تک سلول لیتیوم یون، ب) با گرم کن تک صفحه‌ای، ج) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان ساده، د) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان مخالف و ه) با گرم کن سه صفحه‌ای جریان مخالف زیگزاگ

Fig. 1. a) Single cell li-ion, b) with a single heater plate, c) with three parallel flow heating plates, d) with three counter flow heating plates and e) with three zig-zag flow heating plates.

جدول ۱. ابعاد هندسی باتری

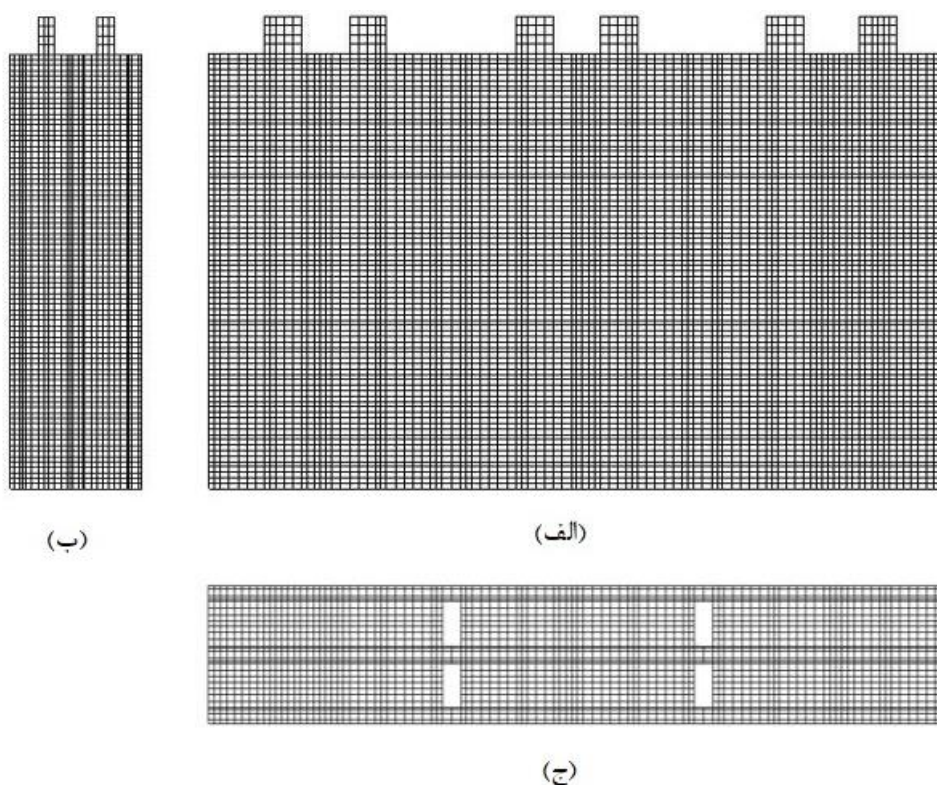
Table 1. Geometrical dimensions of battery

پارامتر	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
مقدار (mm)	۶۳	۱۱۸	۱۰	۱۵	۱۳	۱۰	۱۰

جدول ۲. خواص ترمودینامیکی مواد

Table 2. Material thermodynamic properties

ماده	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	μ (kg/m.s)
آب - اتیلن گلیکول	۱۰۶۴	۳۳۵۸	۰/۳۹۹	۰/۰۰۲۲۶
آلومینیوم	۲۷۱۰	۸۷۱	۲۰۲/۴	-
سلول باتری [۱۳]	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۳	-
خمیر سلیکون	۱۱۲۰	۱۱۷۰	۱/۳۹	-



شکل ۲. شبکه‌ی محاسباتی از نماهای الف) روبرو، ب) جانبی و ج) بالا

Fig. 2. Computational grid from a) front view, b) side view and c) top view

به صورت زیر بیان می‌شود.

$$q_g = \frac{I^2 R_t}{V} \quad (7)$$

در این معادله، R_t مقاومت کل باتری، V ولتاژ و I شدت جریان تولید شده توسط باتری است.

۲-۳- شرایط مرزی

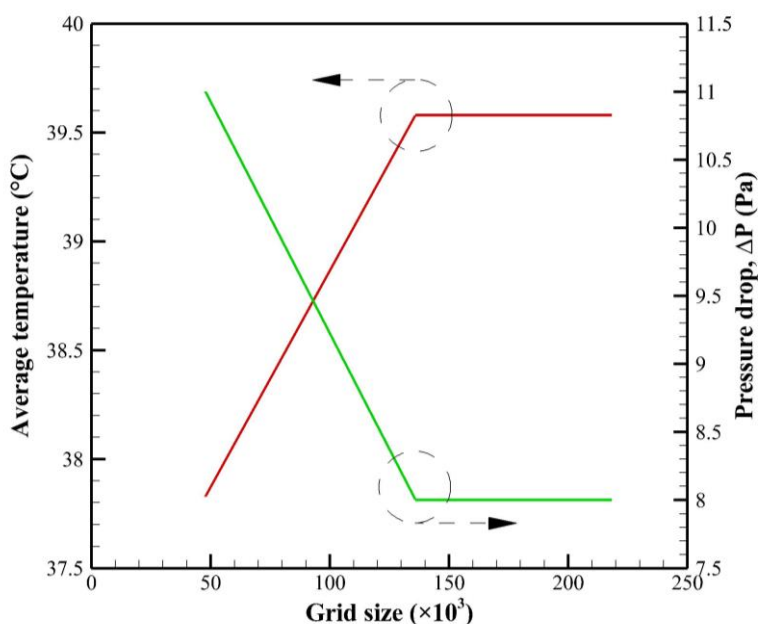
در این تحقیق، باتری‌ها در دمای محیط و برابر ۲۰- درجه سلسیوس قرار دارند و دمای اولیه‌ی آن‌ها برابر با دمای محیط می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطوح باتری و محیط ۵ وات بر متر مربع کلونین است. دبی جرمی سیال گرم‌کن ورودی به کانال‌های صفحه‌ی گرم‌کن نیز ۰/۰۰۱۲، ۰/۰۰۳۶، ۰/۰۰۰۶، ۰/۰۰۸۴ و ۰/۰۱۰۸ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. دمای سیال ورودی نیز ثابت و برابر ۴۰ درجه‌ی سلسیوس است.

۲-۴- شبکه‌ی محاسباتی، استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

شبکه‌ی محاسباتی سازمان‌یافته برای حل عددی در نظر گرفته شده است. تعداد گره‌های محاسباتی در راستاهای x ، y و z به ترتیب ۹۶، ۸۴ و ۳۰ در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نشان دهنده‌ی شبکه‌ی مورد استفاده در این تحقیق است.

برای تأیید استقلال نتایج از شبکه، دو پارامتر افت فشار و دمای میانگین باتری‌ها در ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است و در چند شبکه به دست آمده است. نتایج در دبی ۰/۰۱۰۸ و دمای ورودی ۴۰ درجه‌ی سلسیوس با ۱۳۵۹۴۴ سلول محاسباتی از تعداد شبکه مستقل شده است. شبکه‌ی مذکور به علت وجود جریان در کانال‌ها، دارای ابعاد کوچک‌تری است. شکل ۳ نشان دهنده‌ی استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی می‌باشد.

به منظور اعتبار بخشی به نتایج، مقایسه‌ای بین مدل حاضر و تحقیق انجام شده توسط فن و همکاران [۲۷] در نرخ تخلیه‌ی ۰/۲C از ۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه انجام شده است. دمای میانگین باتری‌ها در طول این زمان



شکل ۳. بررسی استقلال از شبکه توسط دو معیار افت فشار در کانال‌ها و دمای میانگین باتری‌ها

Fig. 3. Mesh independency review based on pressure drop and batteries average temperature criterion

احساس می‌شود. پس از گذشت ۱۸۰۰ ثانیه، دمای باتری‌ها حدود ۰/۱ درجه افزایش داشته است. با نصب یک صفحه‌ی گرم‌کن در میان باتری‌ها و ورود سیال با آرایش ساده و با دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس دمای باتری‌ها بسیار سریع‌تر تغییر می‌کند و به دمای عملیاتی می‌رسد. شکل ۶ نشان دهنده‌ی تغییرات دمای متوسط باتری‌ها و اختلاف دمای حداکثر بین نقاط آن‌ها با حضور سیستم گرمایش باتری است.

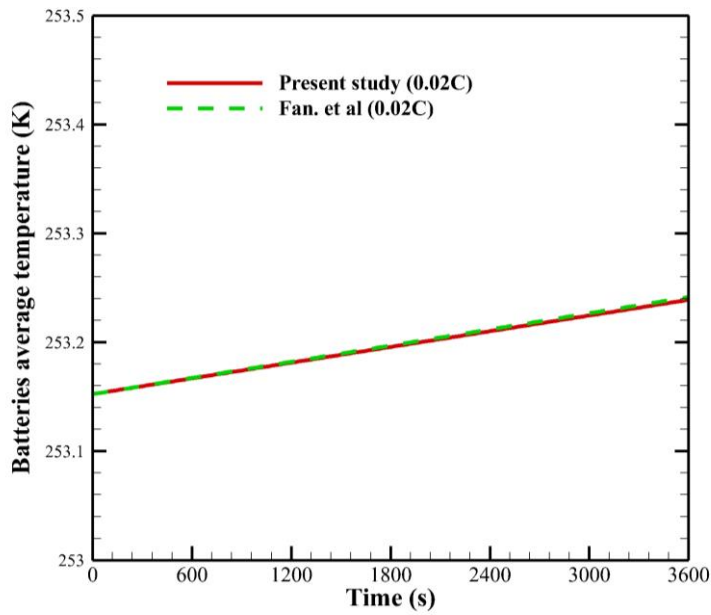
با توجه به شکل ۶ الف، دمای حداکثر باتری‌ها با یک صفحه‌ی گرم‌کن، برابر ۳۸/۲۵ درجه‌ی سلسیوس است. با افزایش دبی سیال ورودی از ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۳۶ کیلوگرم بر ثانیه، مشاهده می‌شود که زمان گرمایش باتری از ۳۹۰ ثانیه به کمتر از ۱۸۰ ثانیه کاهش یافته است. با افزایش دبی سیال تا ۰/۰۶۰ کیلوگرم بر ثانیه، تغییر زمان گرمایش ناچیز خواهد شد. همچنین، شکل ۶ ب نشان می‌دهد که در لحظه‌ی اولیه ورودی سیال به علت افزایش دمای نواحی ورودی، در این نواحی باتری‌ها بیشتر گرم می‌شوند. این امر در دبی‌های پایین بیشتر محسوس است؛ زیرا با کاهش دبی، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد. همچنین در دبی‌های پایین‌تر، دیرتر سیال گرم را به نواحی دیگر می‌رساند که این امر مطلوب نیست. در دبی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه، از ابتدای ورود سیال تا زمان ۹۰ ثانیه، تقریباً اختلاف دما از ۵ درجه تجاوز کرده است. با افزایش دبی (بیشتر از ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر

به عنوان معیار اعتبار سنجی نتایج در نظر گرفته شده است. دمای اولیه‌ی باتری‌ها ۲۰- درجه‌ی سلسیوس می‌باشد و دیواره‌های باتری با ضریب انتقال حرارت جابجایی $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ با محیط (با دمای مشابه با دمای اولیه‌ی باتری‌ها) تبادل حرارت دارند. باتری‌های لیتیوم یونی در نظر گرفته شده در اعتبارسنجی با تحقیق فن و همکاران کاملاً مشابه و با ابعاد $79 \times 148 \times 95$ میلی‌متر بوده است. شکل ۴ نشان دهنده‌ی مقایسه‌ی نتایج می‌باشد که نشان دهنده انطباق مناسبی بین نتایج است.

۳- نتایج و بحث

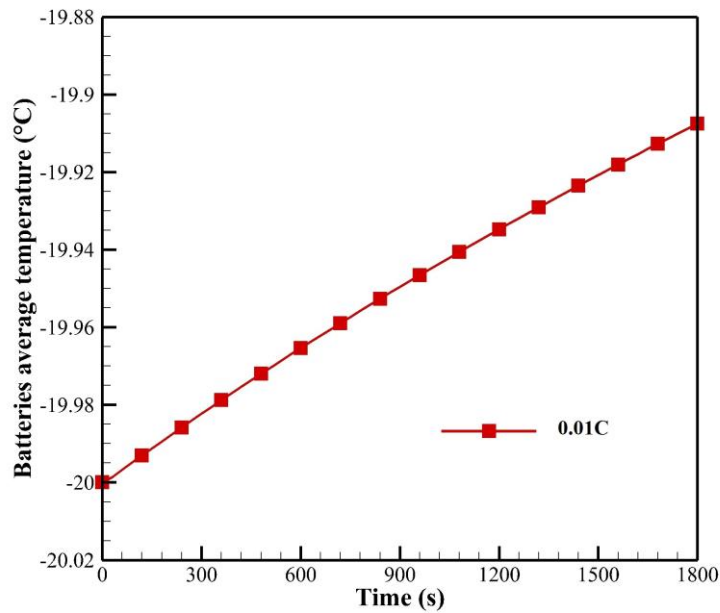
به منظور بررسی عملکرد صفحه‌ی کنترل دما، در ابتدا حل بدون صفحات گرم‌کننده انجام شده است. حل مسئله تا ۱۸۰۰ ثانیه و نرخ تخلیه نیز ثابت و برابر 0.1 C [۲۷] در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵ که دمای میانگین باتری‌ها بر حسب زمان را نشان می‌دهد؛ نتایج نشان می‌دهد که باتری‌ها بدون صفحه‌ی گرم‌کن در نرخ تخلیه‌ی 0.1 C نمی‌توانند تنها با گرمایش ناشی از مقاومت داخلی به دمای مناسب برسند و به گرمایش خارجی نیاز دارند.

شکل ۵ نشان می‌دهد که گرمایش خود باتری‌ها می‌تواند دمای باتری‌ها را تا حدی افزایش دهد؛ اما این مقدار کافی نبوده و نیاز به گرمایش خارجی



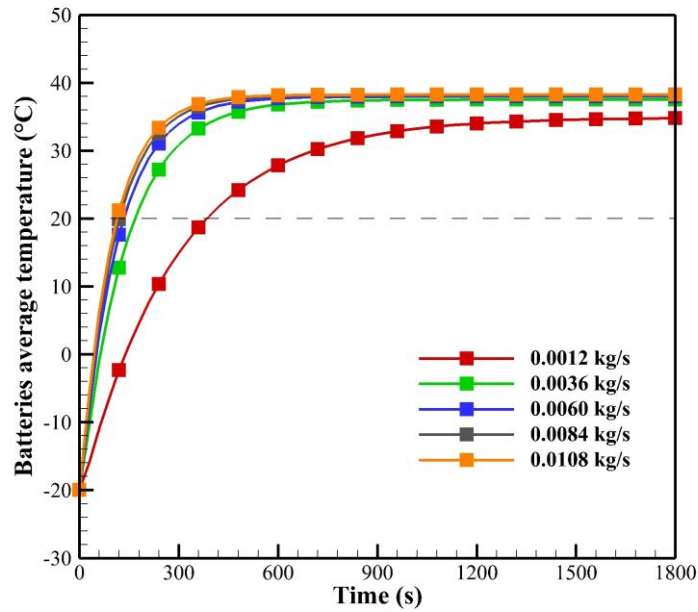
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با تحقیق فن و همکاران [۲۷]

Fig. 4. Comparison between present research with Fan et al. [27]

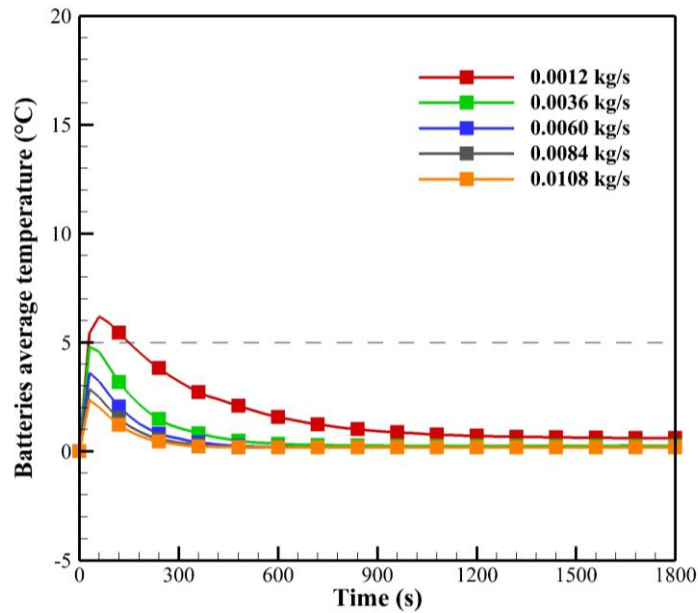


شکل ۵. دمای میانگین باتری‌ها بدون گرمایش خارجی

Fig. 5. Batteries average temperature without external heat source



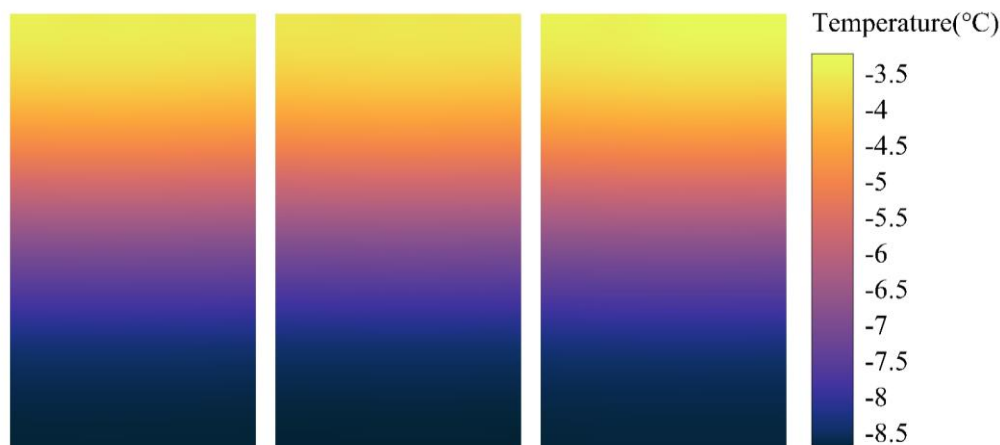
(الف)



(ب)

شکل ۶. تغییرات الف) دمای میانگین باتری، ب) اختلاف دمای حداکثری با دبی جرمی سیال ورودی با یک صفحه

Fig. 6. Variation of a) batteries average temperature, b) maximum temperature difference with mass flow rate in single heating plate



شکل ۷. توزیع دما در سلول‌های باتری‌های پایینی در ۹۰ ثانیه و دبی 0.0012 کیلوگرم بر ثانیه

Fig. 7. Temperature distribution in lower battery cells after 90 second and 0.0012 kg/s mass flow rate

مناسب نیست. در این حالات سرعت سیال برای توزیع یکنواخت مناسب نبوده است؛ اما در دبی 0.0012 کیلوگرم بر ثانیه، به علت تقسیم شدن جرم، دبی به 0.0004 کیلوگرم به ازای هر صفحه می‌رسد. در این حالت آنتالپی در هر صفحه بسیار کاهش می‌یابد و در نتیجه تغییرات دمای باتری بسیار کم است و اختلاف دما از سایر حالات کمتر است. با اعمال تغییرات در نحوه ورود سیال به صفحات در حالت سه صفحه‌ای می‌توان کاهش عملکرد را جبران کرد. شکل ۹ نشان دهنده‌ی عملکرد صفحات در حالت جریان مخالف می‌باشد.

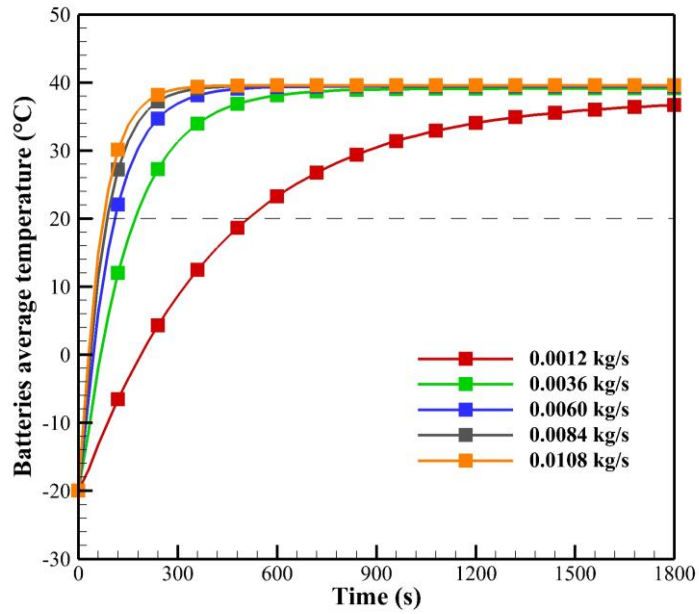
با توجه به شکل ۹، زمان گرم شدن باتری در حالت جریان مخالف تغییر چشمگیری نسبت به آرایش جریان ساده ندارد؛ اما اختلاف دمای حداکثر از مقدار $3/1$ درجه تجاوز نکرده است که امری مطلوب است. به دلیل مشابه، دبی 0.0012 کیلوگرم رفتاری شبیه به حالت قبل دارد. در این حالت نیز مشابه روش پیشین، زمان ماند باتری در اختلاف دمای بالا ($3/1$ درجه) کمتر شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی توزیع دما در زمانی که اختلاف دما در حالت حداکثری قرار دارد (۳۰ ثانیه) و برای دبی 0.0036 می‌باشد؛ زیرا در این دبی اختلاف دمای $3/1$ درجه‌ای حاصل شده است. دلیل کاهش اختلاف دما رسیدن سیال گرم به طور همزمان به بیشتر نواحی صفحات مجاور باتری‌ها است.

با تغییر آرایش جریان از جریان مخالف به جریان مخالف زیگزاگ نیز عملکرد دستخوش تغییر می‌شود. شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی عملکرد صفحه

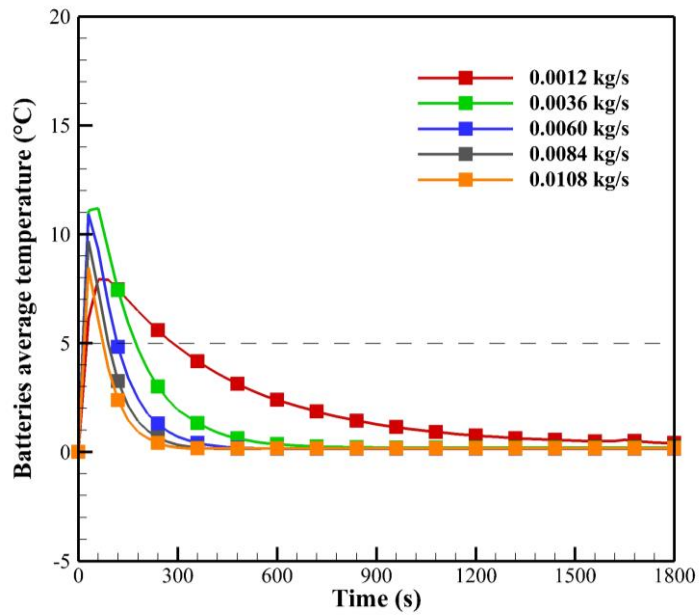
(ثانیه) دیگر افزایش دما مشاهده نشده است. دلیل آن سرعت بیشتر سیال و گرمایش یکنواخت‌تر باتری‌ها است. شکل ۷ نشان دهنده‌ی توزیع دما در باتری‌ها تحت این شرایط در دبی 0.0012 کیلوگرم بر ساعت در ۹۰ ثانیه است.

با افزایش تعداد صفحات گرم‌کن در دبی مشابه با حالت تک صفحه‌ای، عملکرد مجموعه‌ی کنترل دمای باتری به طور نسبی در دبی‌های بالا بهبود پیدا می‌کند؛ زیرا با نصب صفحات گرم‌کن روی دیواره‌های خارجی باتری‌ها، سیال گرم‌کن با این نواحی نیز تبادل حرارت خواهد داشت. در این حالت زمان گرمایش باتری و اختلاف دما افزایش خواهد داشت؛ زیرا در دبی مشابه، دبی به سه قسمت تقسیم شده است که بنا به دلایل بین شده دبی پایین مطلوب نیست. شکل ۸ نشان دهنده‌ی عملکرد مجموعه‌ی گرم‌کن باتری می‌باشد.

در این حالت، بهبودهای حاصل شده شامل کاهش $0/2$ درجه‌ای اختلاف دمای حداکثر باتری‌ها، کاهش زمان ماند باتری در اختلاف دمای بالا و کاهش افت فشار است. به دلیل این که کانال‌ها دارای شکل موازی هستند؛ فشار در حالتی که دبی ثابت باشد؛ یک سوم مقدار حالت تک صفحه‌ای خواهد بود. افت فشار در حالت تک صفحه‌ای در بالاترین دبی ۸ پاسکال و در حالت سه صفحه‌ای $2/66$ کیلو پاسکال خواهد بود. کاهش دبی امر مطلوبی نیست؛ زیرا زمان بیشتری برای گرمایش نواحی سمت خروجی کانال‌ها لازم است و سیال دیرتر به این نقاط می‌رسد. مطابق شکل ۸ ب، در دبی‌ها بالاتر از 0.0012 و کمتر از 0.0108 کیلوگرم بر ثانیه، عملکرد مجموعه‌ی گرم‌کن



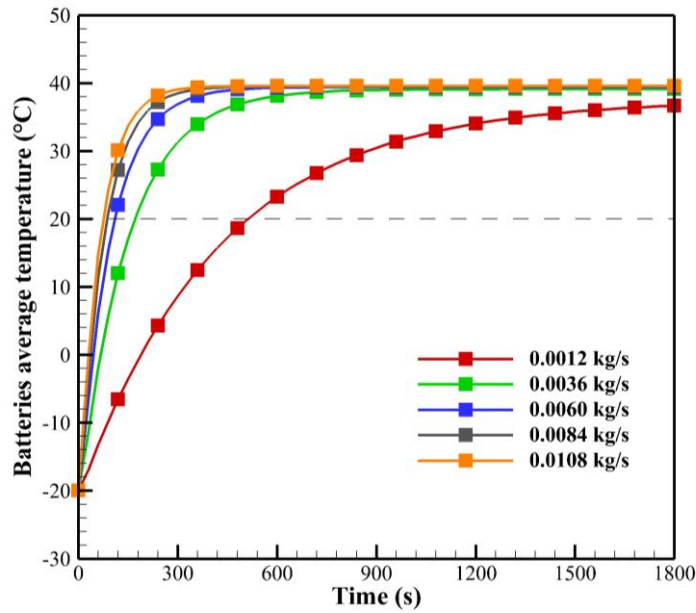
(الف)



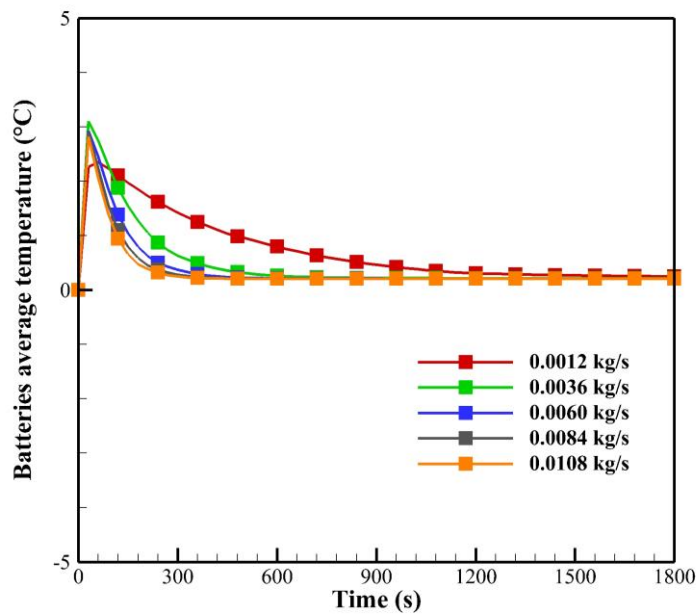
(ب)

شکل ۸. تغییرات الف) دمای میانگین باتری، ب) اختلاف دمای حداکثری با دبی جرمی سیال ورودی به سه صفحه

Fig. 8. Variation of a) batteries average temperature, b) maximum temperature difference with mass fluid flow rate in three heating plates



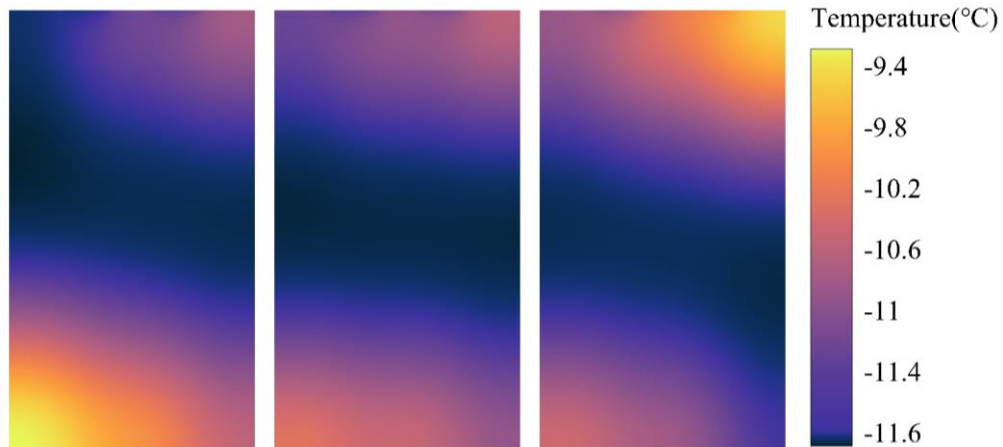
(الف)



(ب)

شکل ۹. تغییرات الف) دمای میانگین باتری، ب) اختلاف دمای حداکثری با دبی جرمی سیال ورودی به سه صفحه با جریان مخالف

Fig. 9. Variation of a) batteries average temperature, b) maximum temperature difference with mass fluid flow rate in three counter flow heating plates



شکل ۱۰. توزیع دما در سلول‌های باتری‌های پایینی در ۳۰ ثانیه و دبی 0.0036 kg/s کیلوگرم بر ثانیه در حالت جریان مخالف

Fig. 10. Temperature distribution in lower battery cells after 30 seconds with 0.0036 kg/s mass flow rate with counter flow arrangement

مختلف باتری‌ها کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش سرعت سیال، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد و سیال با سرعت بیشتری به نواحی مختلف صفحات می‌رسد.

۲- سرعت گرمایش باتری در دبی‌های برابر در حالت تک صفحه‌ای بیشتر است؛ اما اختلاف دما به بیش از $6/2$ درجه نیز می‌رسد که این امر مطلوب نیست.

۳- در گرمایش با سه صفحه، افت فشار در طول کانال‌های عبور سیال کمتر است که کار پمپ را کاهش می‌دهد.

۴- چنانچه زمان گرم شدن باتری‌ها با محدودیت مواجه نباشد؛ بهتر است از روش‌های جریان مخالف استفاده شود؛ زیرا توزیع دما را تا ۸۰ درصد یکنواخت‌تر می‌کند.

۵- تغییر آرایش جریان تقریباً هیچ تأثیری بر کاهش زمان گرم شدن باتری‌ها ندارد و تأثیر چشمگیری بر اختلاف دما بین نقاط باتری‌ها دارد.

۶- در صورتی که آرایش جریان مخالف زیگزاگ با محدودیت مواجه نباشد؛ این روش بهترین آرایش جریان برای گرمایش باتری است.

۷- این مجموعه باتری در شرایط سرد آب و هوایی مانند فصل زمستان، مناطق کوهستانی و کشورهای سردسیر با عملکرد مناسبی خواهد داشت؛ زیرا این سیستم گرمایش می‌تواند باتری‌ها را در زمان مناسب در محدوده‌ی دمایی مطلوب قرار دهد.

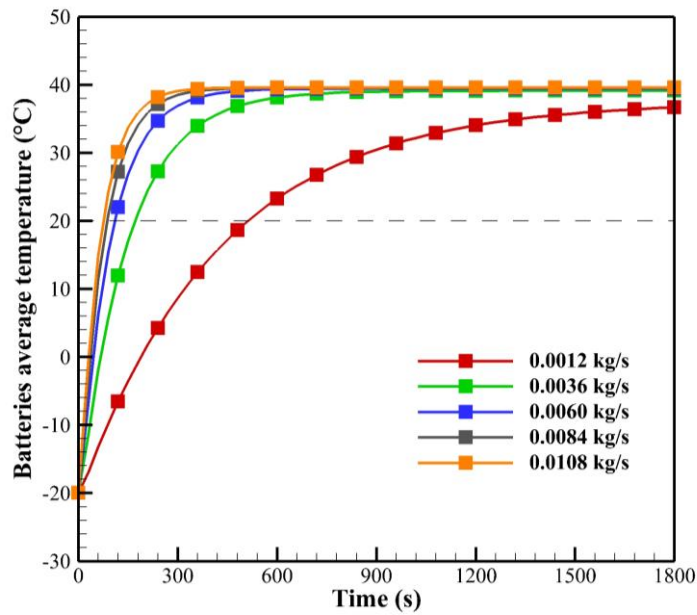
در این حالت است.

با توجه به شکل‌های ۸ الف، ۹ الف و ۱۱ الف می‌توان نتیجه گرفت که زمان گرم شدن باتری‌ها تحت تأثیر آرایش جریان نمی‌باشد و بیشتر از دبی تأثیر می‌پذیرد. شکل ۱۰ ب نیز نشان می‌دهد که با آرایش جریان مخالف زیگزاگ، اختلاف دما در بیشترین مقدار خود، $2/1$ درجه می‌باشد که حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت قبل و بیش از ۸۰ درصد نسبت به حالت آرایش جریان ساده بهبود داشته است. در این حالت نیز مشابه روش قبل، در زمان ۳۰ ثانیه و دبی 0.0036 kg/s کیلوگرم، اختلاف دما حداکثر است. شکل ۱۲ توزیع دما در این حالت را نشان می‌دهد.

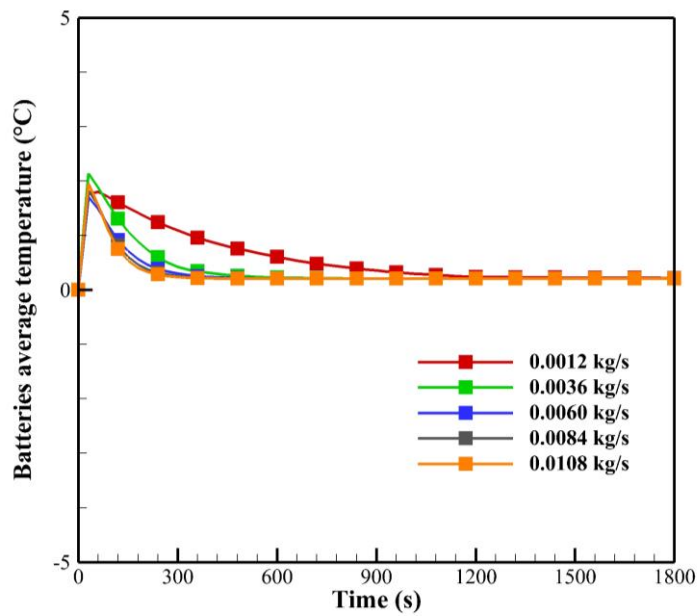
۴- نتیجه‌گیری

در راستای جلوگیری از کاهش عملکرد باتری‌های لیتیوم یون که در شرایط سرد محیطی قرار دارند؛ در این تحقیق مدل‌سازی سه بعدی یک سیستم کنترل دمای باتری صفحه‌ای انجام شده است. ۶ باتری با مجموع ولتاژ ۲۴ ولت به منظور انجام این کار در نظر گرفته شده و دمای محیط و دمای اولیه‌ی باتری‌ها -20 درجه‌ی سلسیوس است. اثرات دبی، تعداد صفحات و آرایش جریان بر دو مشخصه اساسی دمای میانگین باتری‌ها و اختلاف دمای حداکثر و همچنین زمان گرمایش باتری‌ها بررسی گردیده است. نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد.

۱- با افزایش دبی جریان، زمان گرمایش باتری و اختلاف دما در نقاط



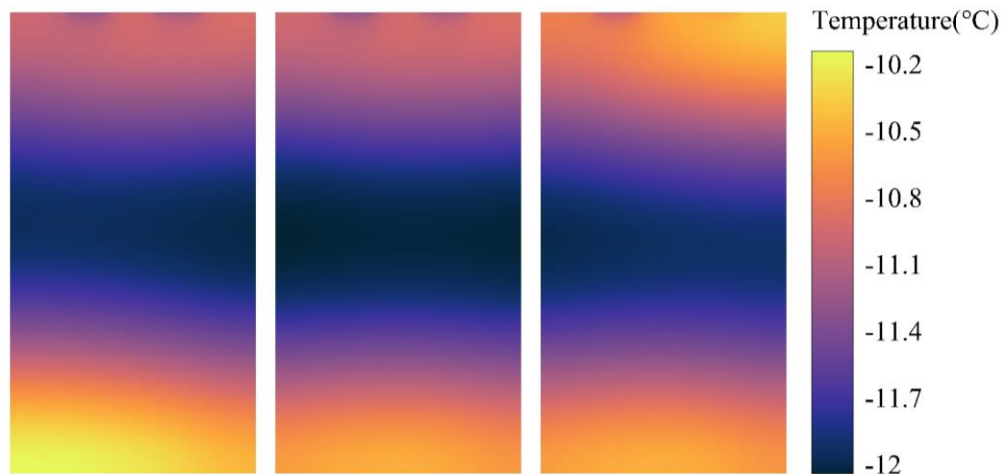
(الف)



(ب)

شکل ۱۱. تغییرات الف) دمای میانگین باتری، ب) اختلاف دمای حداکثری با دبی جرمی سیال ورودی به سه صفحه با جریان مخالف زیگزاگ

Fig. 11. Variation of a) batteries average temperature, b) maximum temperature difference with mass fluid flow rate in three zig-zag flow heating plates



شکل ۱۲. توزیع دما در سلول‌های باتری‌های پایینی در ۳۰ ثانیه و دبی ۰/۰۰۳۶ کیلوگرم بر ثانیه در حالت جریان مخالف زیگزاگ

Fig. 12. Temperature distribution in lower battery cells after 30 seconds with 0.0036 kg/s mass flow rate with zig-zag flow arrangement

منابع

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

c_p ظرفیت حرارتی ویژه، J/kg.K

I شدت جریان، A

K ضریب انتقال حرارت هدایتی، W/m.K

q_g تولید گرما، W/m^۳

R_t مقاومت کل باتری، Ω

V ولتاژ، V

T دما، K

t زمان، s

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^۳

v سرعت، m/s

μ لزجت دینامیکی، Pa/s

زیرنویس

b باتری

c سیال خنک‌کن/گرم‌کن

g تولید

h صفحه‌ی گرم‌کن

s خمیر سیلیکون

- [1] J. Lopez, M. Gonzalez, J.C. Viera, C. Blanco, Fast-charge in lithium-ion batteries for portable applications, in: INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference, IEEE, (2004) 19–24.
- [2] C. Zhao, W. Cao, T. Dong, F. Jiang, Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow, International Journal of Heat and Mass Transfer. 120 (2018) 751–762.
- [3] X. Zhang, X. Chang, Y. Shen, Y. Xiang, Electrochemical-electrical-thermal modeling of a pouch-type lithium-ion battery: An application to optimize temperature distribution, Journal of Energy Storage. 11 (2017) 249–257.
- [4] A.A. Pesaran, S. Santhanagopalan, G.-H. Kim, Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications, Advanced and Fuels Research Energy Storage (2013).
- [5] A.A. Pesaran, Battery thermal models for hybrid vehicle simulations, Journal of Power Sources. 110 (2002) 377–382.

- [16] K. Chen, M. Song, W. Wei, S. Wang, Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 132 (2019) 309–321.
- [17] R. Jilte, A. Afzal, S. Panchal, A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials, *Energy*. 219 (2021) 119564.
- [18] Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Deng, C. Wang, Thermal management of Lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials, *Applied Thermal Engineering*. 183 (2021) 116151.
- [19] R. Taherian, Application of Polymer-Based Composites: Bipolar plate of PEM fuel cells, plastics design library, William Andrew, (2019) 183–237.
- [20] F.A. de Bruijn, R.C. Makkus, R.K.A.M. Mallant, G.J.M. Janssen, Chapter Five Materials for State-of-the-Art PEM Fuel Cells, and Their Suitability for Operation Above 100°C, *Advances in Fuel Cell*, Elsevier Science, (2007) 235–336.
- [21] G. Liang, L. Zheng, N. Zhu, A. Gu, Dielectric polymer materials with high thermal stability, plastics design library, (2018) 383–427.
- [22] M.S. Patil, J.-H. Seo, M.-Y. Lee, A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management, *Energy Conversion and Management*. 229 (2021) 113715.
- [23] T. Zhang, Q. Gao, Y. Gu, Y. li, Studies on thermal management of lithium-ion battery using non-metallic heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*. 182 (2021) 116095.
- [24] T. Deng, Y. Ran, G. Zhang, Y. Yin, Novel leaf-like channels for cooling rectangular lithium - ion batteries, *Applied Thermal Engineering*. 150 (2019) 1186–1196.
- [25] J. Xun, R. Liu, K. Jiao, Numerical and analytical modeling of lithium - ion battery thermal behaviors with different cooling designs, *Journal of Power Sources*. 233 (2013) 47–61.
- [6] A. Jarrett, I.Y. Kim, Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, *Journal of Power Sources*. 196 (2011) 10359–10368.
- [7] J. Kim, J. Oh, H. Lee, Review on battery thermal management system for electric vehicles, *Applied Thermal Engineering*. 149 (2019) 192–212.
- [8] S.S. Zhang, K. Xu, T.R. Jow, The low temperature performance of Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*. 115 (2003) 137–140.
- [9] Z. Lei, Y. Zhang, X. Lei, Improving temperature uniformity of a lithium-ion battery by intermittent heating method in cold climate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 121 (2018) 275–281.
- [10] J. Jagemont, L. Boulon, Y. Dubé, A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures, *Applied Energy*. 164 (2016) 99–114.
- [11] B. Ziv, V. Borgel, D. Aurbach, J.-H. Kim, X. Xiao, B.R. Powell, Investigation of the reasons for capacity fading in Li-Ion battery cells, *Journal of the Electrochemical Society*. 161 (2014) A1672-A1680.
- [12] J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukiazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, M.W. Verbrugge, Degradation of lithium - ion batteries employing graphite negatives and nickel-cobalt-manganese oxide+ spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation, *Journal of Power Sources*. 269 (2014) 937–948.
- [13] Z. Qian, Y. Li, Z. Rao, Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling, *Energy Conversion and Management*. 126 (2016) 622–631.
- [14] L.W. Jin, P.S. Lee, X.X. Kong, Y. Fan, S.K. Chou, Ultra-thin mini channel LCP for EV battery thermal management, *Applied Energy*. 113 (2014) 1786–1794.
- [15] S. Basu, K.S. Hariharan, S.M. Kolake, T. Song, D.K. Sohn, T. Yeo, Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system, *Applied Energy*. 181 (2016) 1–13.
- [26] G. Karimi, X. Li, Thermal management of lithium-

- (2021) 117265.
- [29] P. Shamsizadeh, E. Afshari, Numerical modeling of a membrane humidifier for mechanical ventilation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 132 (2022) 105931.
- [30] A. Gharehghani, J. Gholami, P. Shamsizadeh, S. Mehranfar, Effect analysis on performance improvement of battery thermal management in cold weather, *Journal of Energy Storage*. 45 (2022) 103728.
- ion batteries for electric vehicles, *International Journal of Energy Research*. 37 (2013) 13–24.
- [27] R. Fan, C. Zhang, Y. Wang, C. Ji, Z. Meng, L. Xu, Y. Ou, C.S. Chin, Numerical study on the effects of battery heating in cold climate, *Journal of Energy Storage*. 26 (2019) 100969.
- [28] P. Shamsizadeh, E. Afshari, M.M. Dehkordi, Design of membrane humidifier using obstacles in the flow channels for ventilator, *Applied Thermal Engineering*.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Shamsizade, E. Ashari, Numerical Modeling of Li-Ion Battery Temperature Control System at Low Initial Temperature, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 2085-2102.

DOI: [10.22060/mej.2022.20343.7212](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20343.7212)



