



# Numerical Modeling of Li-Ion Battery Temperature Control System at Low Initial Temperature

P. Shamsizade, E. Ashari \*

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**ABSTRACT:** Li-ion battery temperature affects its performance, significantly, and keeping its temperature in proper operational temperature is obligatory; so, this guarantees the performance, safety, and life span of the battery. In this study, the performance of the planar Li-ion battery temperature management system with 6 cells in cold weather (initial temperature  $-20^{\circ}\text{C}$ ) is investigated. The maximum temperature difference and the average temperature of the battery cells are the two main performance criteria of the temperature management system. Effects of mass flow rate, number of heating plates, and flow arrangement consisting of parallel, counter, and zig-zag flow arrangements on the performance criterion and also on the warm-up time are studied. Results show that by increasing the fluid mass flow rate batteries reach the proper temperature ( $20^{\circ}\text{C}$ ) faster and the temperature difference decreases. At a constant mass rate, the addition of heating plates decreases the warm-up time. The zig-zag flow arrangement has better performance in terms of temperature difference criteria up to 8 times and reaches 2.1 degrees at the maximum value, but parallel-flow warms up the batteries faster than the other flow arrangements.

## Review History:

Received: Jul. 29, 2021

Revised: Jul. 22, 2022

Accepted: Sep. 10, 2022

Available Online: Oct. 18, 2022

## Keywords:

Li-ion battery

Temperature management

Cold weather

Operational temperature

Flow arrangement

## 1- Introduction

Nowadays, Li-ion batteries are widely used in portable devices such as mobile phones, laptops, and Electric Vehicles (EVs). Batteries are the main source of these devices and directly affect their performances. Li-ion batteries are more operative due to their power density, efficacy, and longer life span. Also; self-discharge and memory effect which lessens the battery life are lower in this kind of battery. However, the temperature of the Li-ion battery directly influences its performance and this makes Li-ion battery temperature management an important issue. The proper range of operative temperature of Li-ion batteries is between  $20^{\circ}\text{C}$  and  $40^{\circ}\text{C}$ . At temperatures lower than  $20^{\circ}\text{C}$  performance suddenly drops due to the increment of electrolyte viscosity and internal resistance. Also, temperatures higher than  $40^{\circ}\text{C}$  lowers the battery life and yield fewer battery cycles. Hence Li-ion battery temperature management is important [1-4].

Many investigations are performed in order to maintain the Li-ion batteries' temperature in the proper range. Qian et al. [5] have studied micro-channels for Li-ion battery pack cooling and showed that this method can decrease the batteries' average temperature by 5 degrees. Chen et al. [6] optimized a temperature control system for a battery pack including 24 Li-ion batteries and decreased the pack temperature by 4 degrees.

Phase change material application showed a similar result for cooling cases [7]. Direct contact between the batteries and the coolant fluid has been investigated by Patil et al. [8] for a 50V battery pack. They showed that direct contact cooling can reduce the battery temperature by 9.3 percent more than indirect cooling. Fan et al. [9] performed an investigation on Li-ion battery heating so they can reach the proper operative temperature in very cold weather. Results showed that a higher mass flow rate influences the temperature difference more than the average temperature.

Li-ion batteries need both heating and cooling systems based on operational circumstances. Previous research is mainly focused on the cooling of Li-ion batteries. Hence; in this study Li-ion battery pack, heating for the batteries in extremely low initial temperatures is investigated to prevent battery life decrement and more uniform temperature distribution in them. For this purpose, a 3D model has been performed with the Computational Fluid Dynamics (CFD) software FLUENT and the effects of heating plates number, mass flow rate, and three flow arrangements consisting of parallel, counter and zig-zag flows on the average temperature and the maximum temperature difference of the batteries are investigated. Silicon paste is applied between the batteries and the heating plates in order to reduce contact resistance.

\*Corresponding author's email: e.afshari@eng.ui.ac.ir



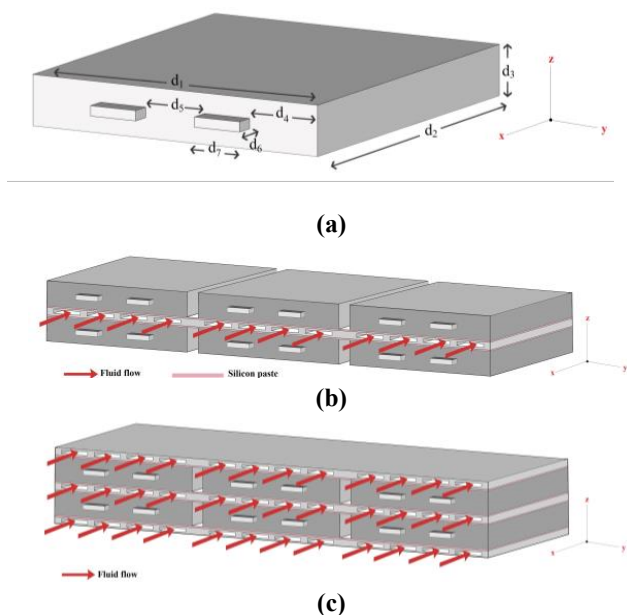


Fig. 1. a) single-cell Li-ion, b) with a single heater plate, c) with three parallel flow

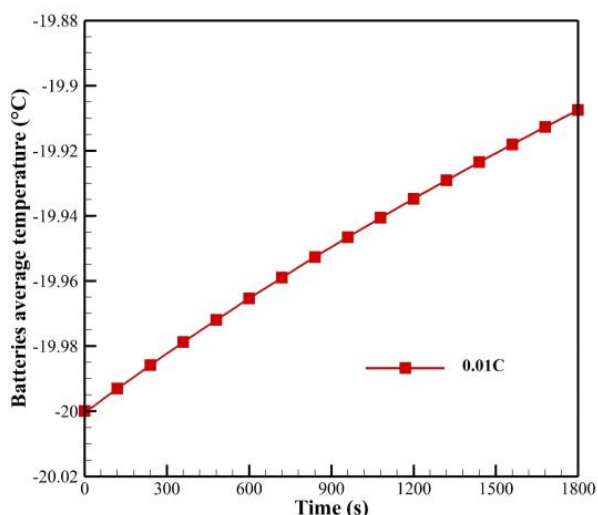
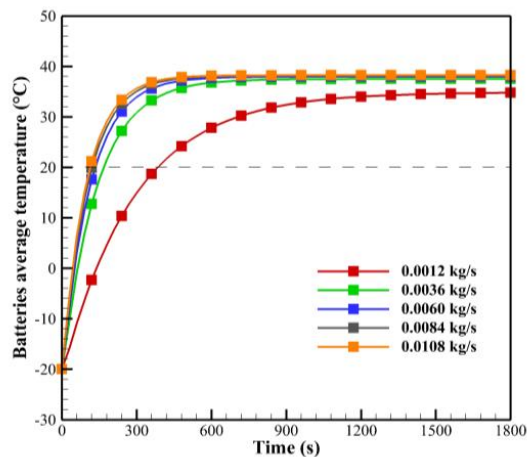


Fig. 2. Batteries' average temperature without an external heat source.

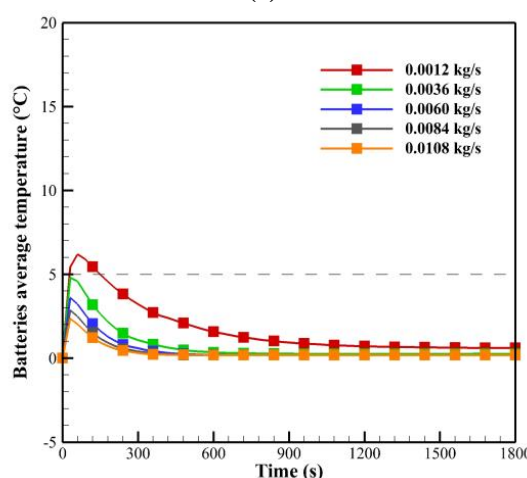
## 2- Governing Equations and Methodology

A planar Li-ion battery pack temperature management system is investigated in this literature. heating Fluid enters the plates and warm-ups the batteries at a low initial temperature (-20°C) in contact with the heating plates. Fig. 1 displays the three-dimensional model consisting of a single Li-ion battery cell and the pack with 6 Li-ion batteries and various numbers of heating plates which are performed and numerically solved by CFD software Fluent. This investigation focuses on maintaining the batteries' temperature at their proper operating temperature which is 20°C to 40°C.

Nonlinear governing equations consisting of



(a)



(b)

Fig. 3. Variation of a) batteries average temperature, b) maximum temperature difference with a mass flow rate in a single heating plate

conservations of mass, momentum, and energy are developed under time-transient circumstances. The fluid flow is always laminar (Reynold less than 2300) and single phase. The heat generation in the batteries is derived by the  $q_s = I^2 R_t / V$ . Where  $R_t$  is total resistance,  $V$  is voltage and  $I$  is the current generated by the battery.

A structured grid is considered for the study with 135944 computational cells which makes the study independent from the grid size. The problem is solved for constant  $C$  rate and 40°C flow temperature up to 1800s.

## 3- Results and Discussion

Results showed that the battery pack is unable to get to the proper temperature range without an external heat source after 1800 seconds with a 0.01C discharge rate which is shown in Fig. 2. With the insertion of one heating plate batteries could get the proper range in about 300s with 0.0012kg/s but the temperature difference exceeds 5 degrees in this case. This issue is shown in Fig. 3.

According to Fig. 3, more mass flow rate causes a more uniform temperature distribution due to the lower temperature difference in cells. Also, this has less effect on the warm-up time. Adding more plates lowers the warm-up time but in short times it causes a non-uniform temperature distribution which is maintained by changing the fluid flow arrangement.

#### 4- Conclusion

This investigation performed a study on Li-ion batteries in low initial temperatures in order to increase battery lifetime. A 24V battery pack consisting of 6 Li-ion cells at -20°C initial temperature is considered for this literature. Results showed that:

Warm-up time and temperature difference decrease with the increase of mass flow rate due to the higher convective heat transfer coefficient.

Changing the fluid flow pattern has a negligible effect on the warm-up time but it seriously affects the temperature distribution.

The zig-zag flow arrangement is better for battery warming, of its application limitations, are ignored.

#### References

- [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] J. Kim, J. Oh, H. Lee, Review on battery thermal management system for electric vehicles, *Applied Thermal Engineering*. 149 (2019) 192–212.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] R. Jilte, A. Afzal, S. Panchal, A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials, *Energy*. 219 (2021) 119564.
- [8] 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.
- [9] 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.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Shamsizade, E. Ashari, Numerical Modeling of Li-Ion Battery Temperature Control System at Low Initial Temperature, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(9) (2022) 417-420.

DOI: 10.22060/mej.2022.20343.7212







## 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  $20^{\circ}\text{C}$ ) 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  $20^{\circ}\text{C}$  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 شونده‌ی ناچیز و اثر حافظه‌ی<sup>۲</sup> 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  $20^{\circ}\text{C}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس بیان شده است [۴-۷]. در دماهای پایین‌تر از  $20^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس به دلیل افزایش لزجت الکترولیت و مقاومت

داخلی باتری، عملکرد آن با افت ناگهانی مواجه می‌شود [۸-۱۰]. دماهای بیش از  $40^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس نیز عمر باتری لیتیوم یون را کاهش می‌دهد و تعداد چرخه‌های کمتری را در اختیار می‌گذارد [۱۱ و ۱۲]. بر این اساس؛ حفظ دمای باتری در محدوده‌ی ذکر شده امری مهم است.

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی کنترل دمای باتری‌های لیتیوم یون در محدوده‌ی مناسب با استفاده از سیستم‌های کنترل دما انجام شده است. کبان و همکاران [۱۳] استفاده از کانال‌ها با ابعاد کوچک را در سیستم خنک‌کاری صفحه‌ای باتری لیتیوم یون بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این کانال‌ها می‌توان تا ۵ درجه دمای متوسط باتری‌ها را کاهش داد که با افزایش دبی سیال خنک‌کننده، کاهش بیشتر دمای باتری‌ها را به دنبال داشته است. همچنین اختلاف دمای حداکثر تا ۸۷ درصد کاهش یافته است. جین و همکاران [۱۴] سعی در طراحی سیستمی داشتند که بتواند دمای یک مجموعه‌ی باتری لیتیوم یونی را با دبی سیال ورودی  $0.15$  لیتر بر دقیقه در کمتر از  $50^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس حفظ کند. در کار آنها میکروکانال‌ها با استفاده از پره ایجاد شده بودند. در خلال شارژ باتری‌های لیتیوم یونی

- 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  $\mu$  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

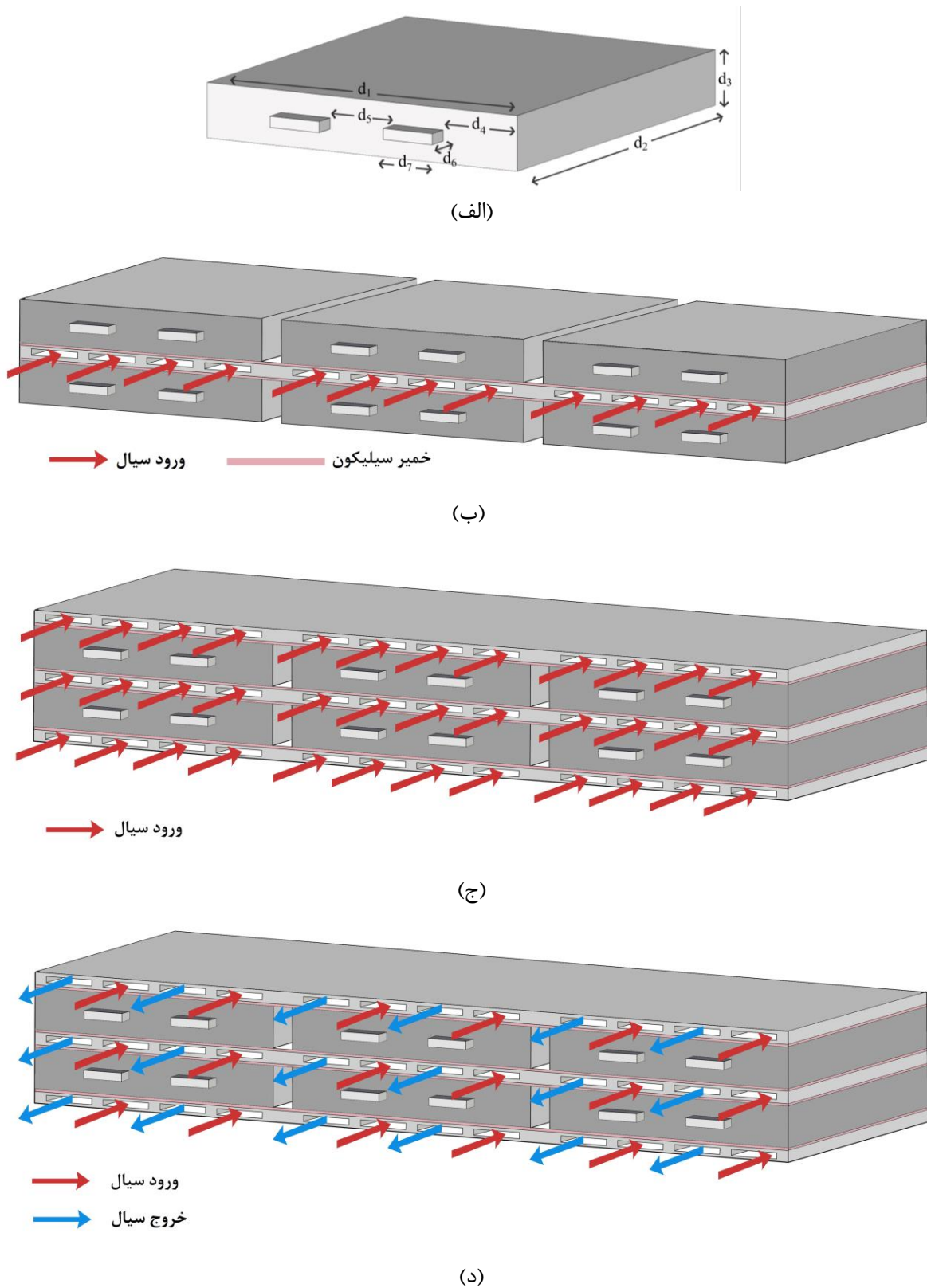
به منظور حصول اطمینان از بقای جرم، معادله‌ی بقای جرم به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۰].

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

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

### ۲-۲-۲- بقای مومنتوم

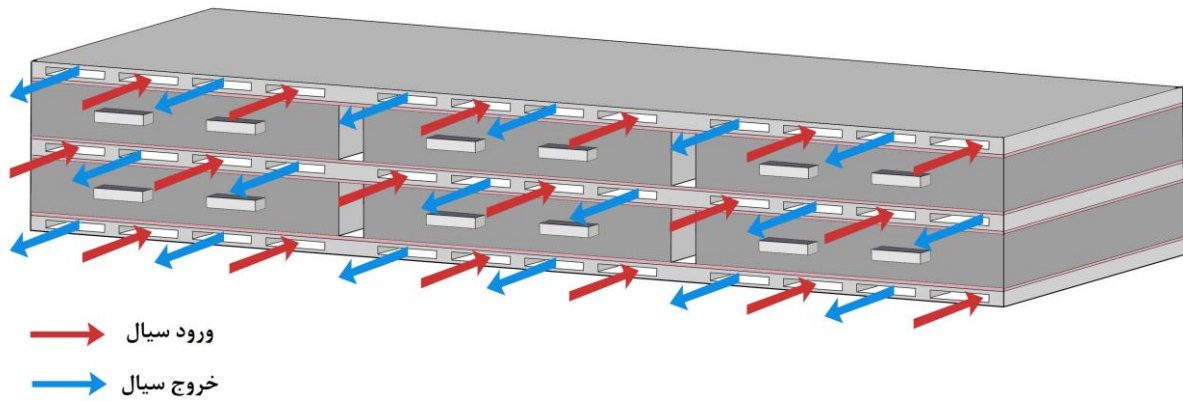
معادله‌ی بقای مومنتوم به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۰].



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

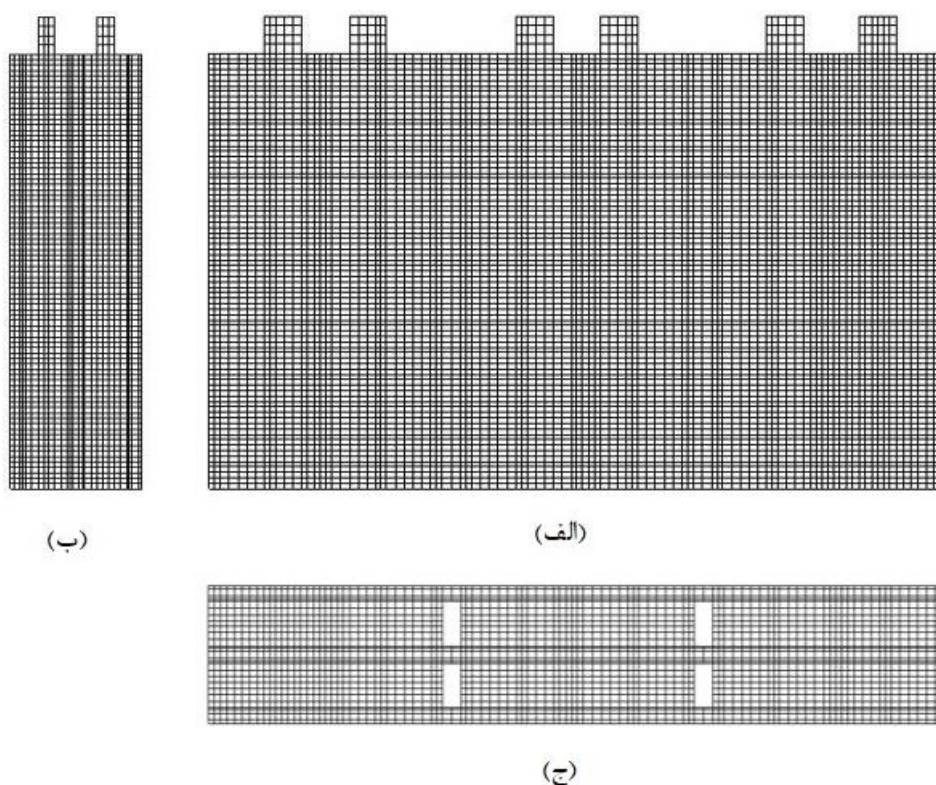
Table 1. Geometrical dimensions of battery

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	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_p(\text{J/kg.K})$	$k(\text{W/m.K})$	$\mu(\text{kg/m.s})$
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

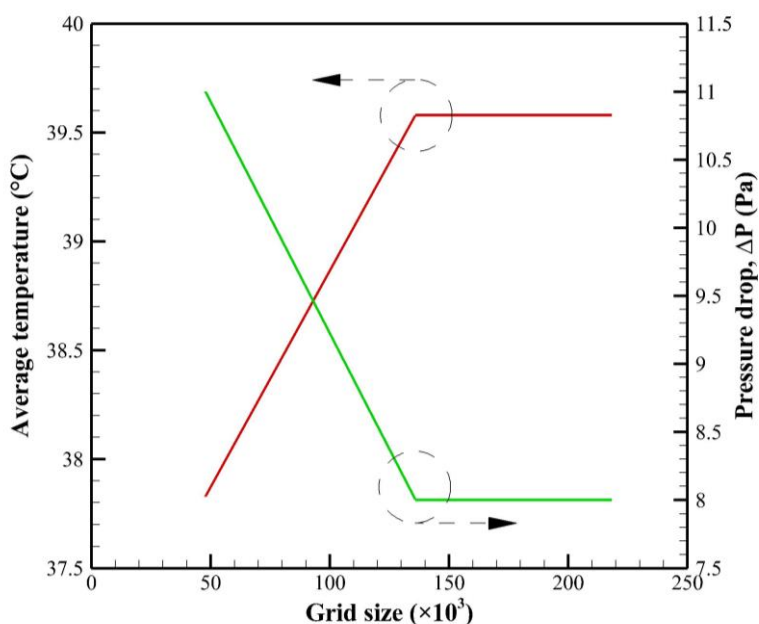
در این تحقیق، باتری‌ها در دمای محیط و برابر ۲۰- درجه سلسیوس قرار دارند و دمای اولیه‌ی آن‌ها برابر با دمای محیط می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطوح باتری و محیط ۵ وات بر متر مربع کلونین است. دبی جرمی سیال گرم‌کن ورودی به کانال‌های صفحه‌ی گرم‌کن نیز ۰/۰۰۱۲، ۰/۰۰۳۶، ۰/۰۰۰۶، ۰/۰۰۸۴ و ۰/۰۱۰۸ کیلوگرم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

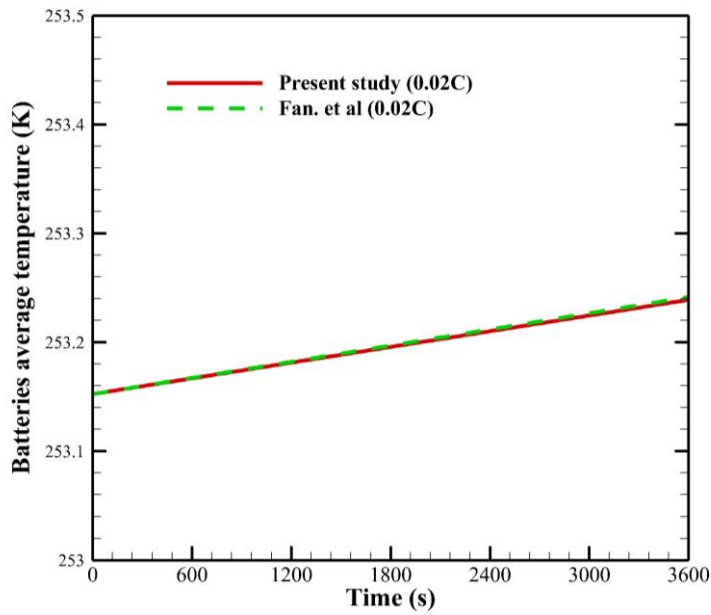
با توجه به شکل ۶ الف، دمای حداکثر باتری‌ها با یک صفحه‌ی گرم‌کن، برابر ۳۸/۲۵ درجه‌ی سلسیوس است. با افزایش دبی سیال ورودی از ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۳۶ کیلوگرم بر ثانیه، مشاهده می‌شود که زمان گرمایش باتری از ۳۹۰ ثانیه به کمتر از ۱۸۰ ثانیه کاهش یافته است. با افزایش دبی سیال تا ۰/۰۶۰ کیلوگرم بر ثانیه، تغییر زمان گرمایش 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

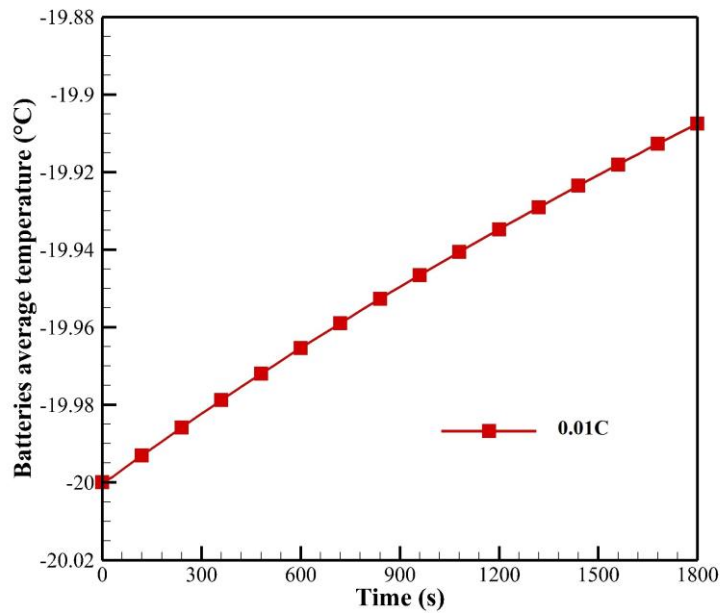
به منظور بررسی عملکرد صفحه‌ی کنترل دما، در ابتدا حل بدون صفحات گرم‌کننده انجام شده است. حل مسئله تا ۱۸۰۰ ثانیه و نرخ تخلیه نیز ثابت و برابر  $0.1 \text{ C}$  [۲۷] در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵ که دمای میانگین باتری‌ها بر حسب زمان را نشان می‌دهد؛ نتایج نشان می‌دهد که باتری‌ها بدون صفحه‌ی گرم‌کن در نرخ تخلیه‌ی  $0.1 \text{ C}$  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



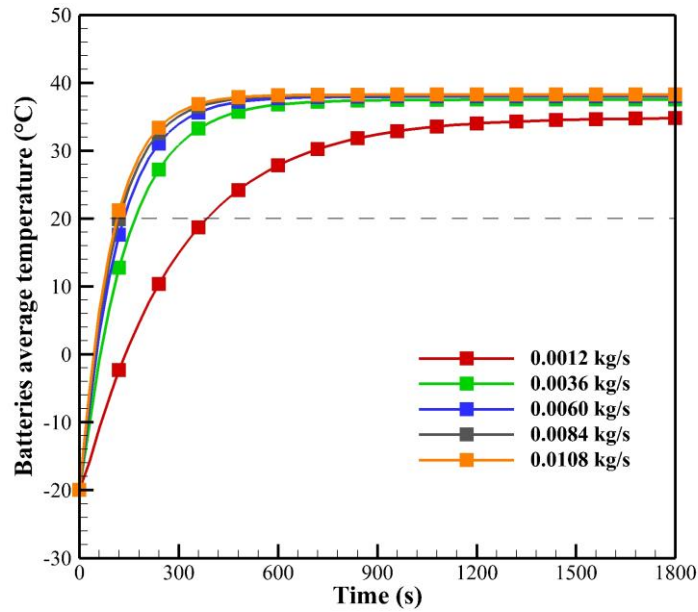
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با تحقیق فن و همکاران [۲۷]

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

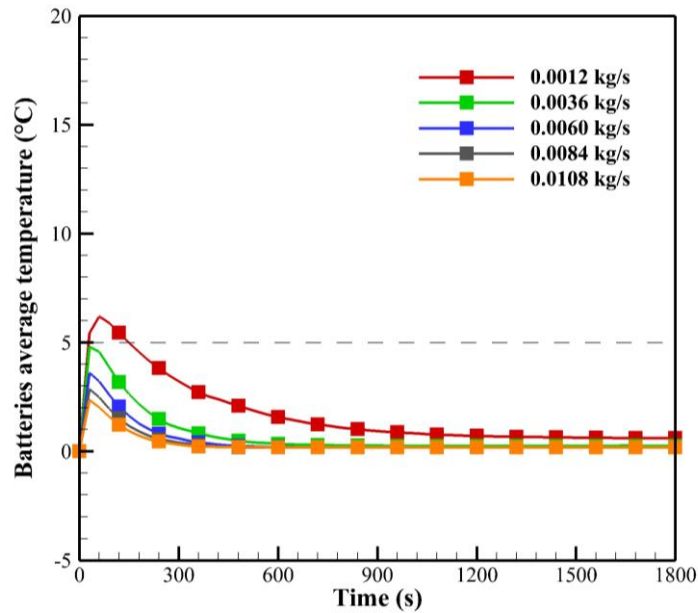


شکل ۵. دمای میانگین باتری‌ها بدون گرمایش خارجی

Fig. 5. Batteries average temperature without external heat source



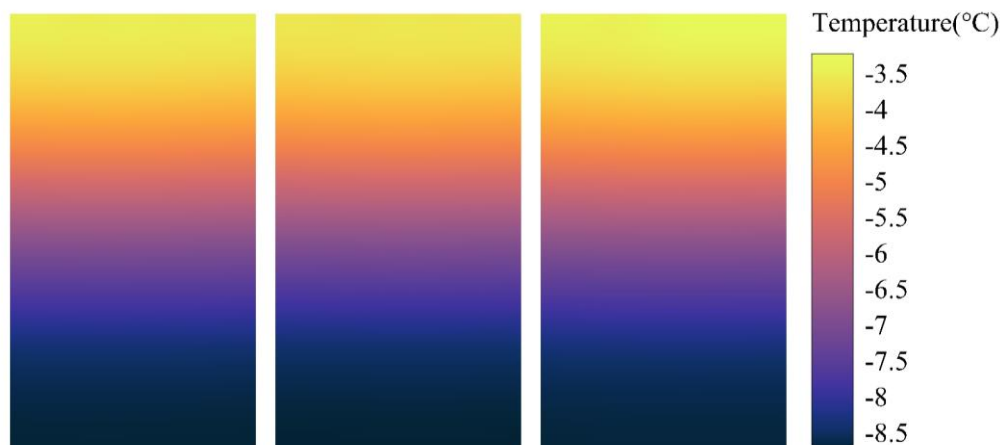
(الف)



(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 ۰/۰۰۱۲ 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 ۰/۰۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه، به علت تقسیم شدن جرم، دبی به ۰/۰۰۰۴ 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 ۳/۱ درجه تجاوز نکرده است که امری مطلوب است. به دلیل مشابه، دبی ۰/۰۰۱۲ کیلوگرم رفتاری شبیه به حالت قبل دارد. در این حالت نیز مشابه روش پیشین، زمان ماند باتری در اختلاف دمای بالا (۳/۱ 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 ۰/۰۰۳۶ می‌باشد؛ زیرا در این دبی اختلاف دمای ۳/۱ درجه‌ای حاصل شده است. دلیل کاهش اختلاف دما رسیدن سیال گرم به طور همزمان به بیشتر نواحی صفحات مجاور باتری‌ها است.

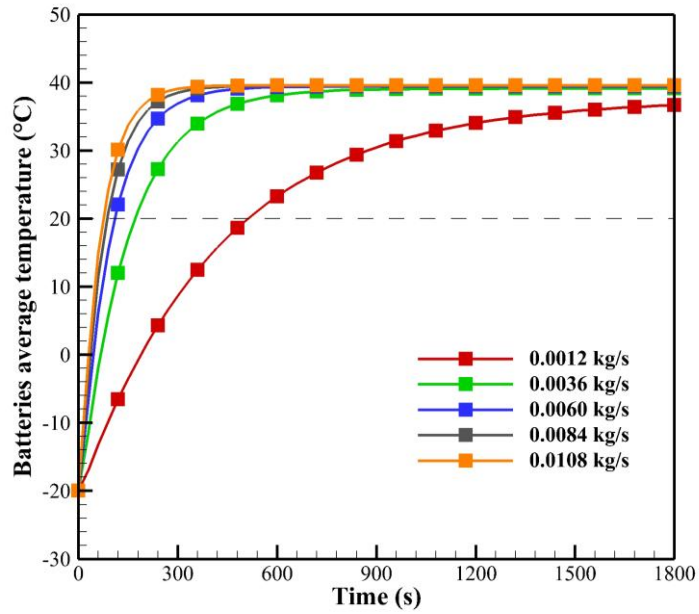
با تغییر آرایش جریان از جریان مخالف به جریان زیگزاگ نیز عملکرد دستخوش تغییر می‌شود. شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی عملکرد صفحه

(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 ۰/۰۰۱۲ کیلوگرم بر ساعت در ۹۰ ثانیه است.

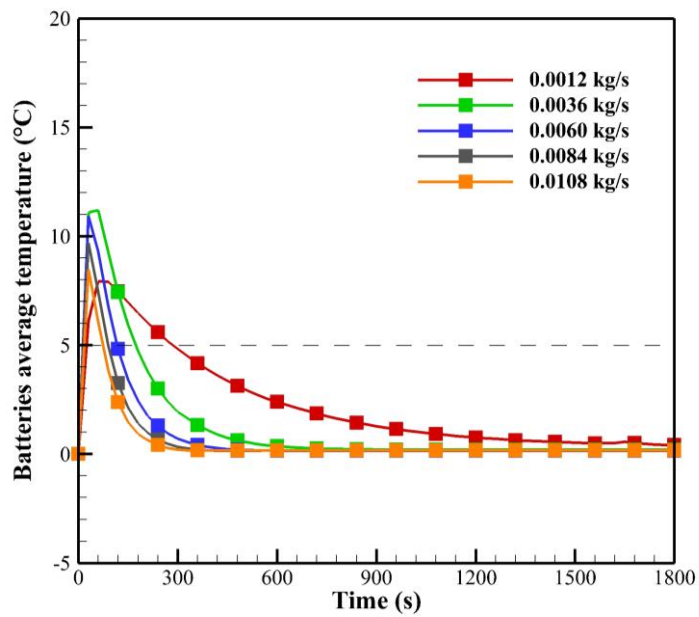
با افزایش تعداد صفحات گرم‌کن در دبی مشابه با حالت تک صفحه‌ای، عملکرد مجموعه‌ی کنترل دمای باتری به طور نسبی در دبی‌های بالا بهبود پیدا می‌کند؛ زیرا با نصب صفحات گرم‌کن روی دیواره‌های خارجی باتری‌ها، سیال گرم‌کن با این نواحی نیز تبادل حرارت خواهد داشت. در این حالت زمان گرمایش باتری و اختلاف دما افزایش 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 ۰/۲ 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 ۲/۶۶ 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 ۰/۰۰۱۲ و کمتر از ۰/۰۱۰۸ کیلوگرم بر ثانیه، عملکرد مجموعه‌ی گرم‌کن





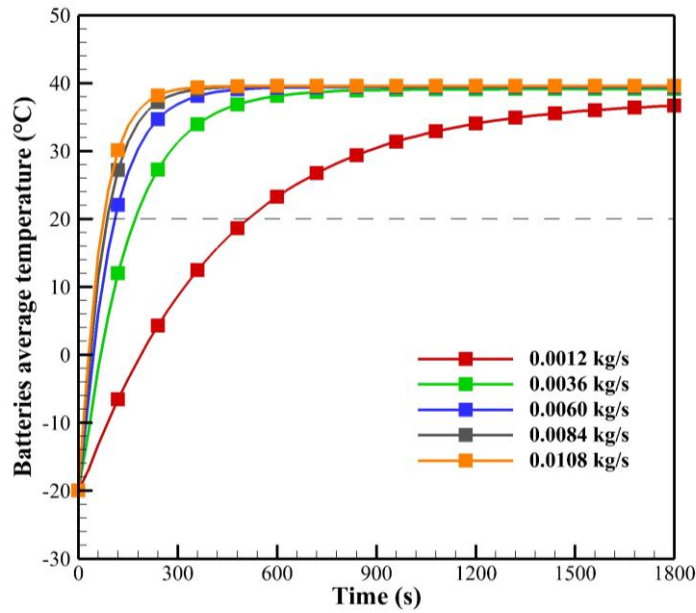
(الف)



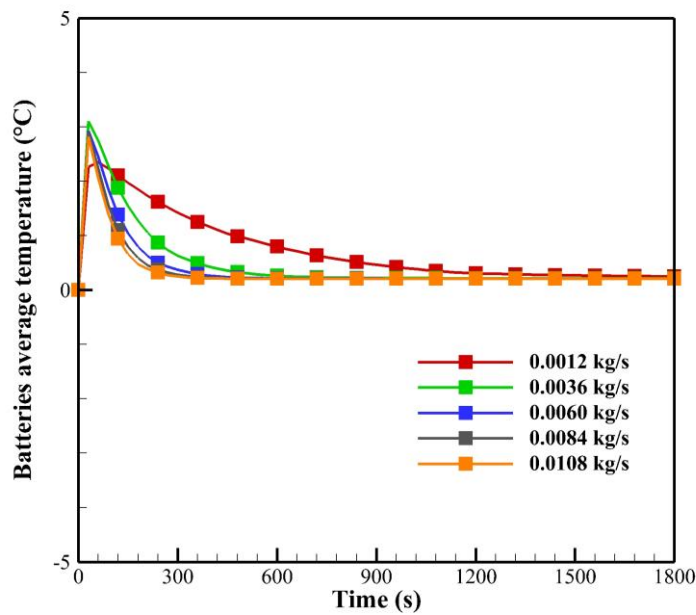
(ب)

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



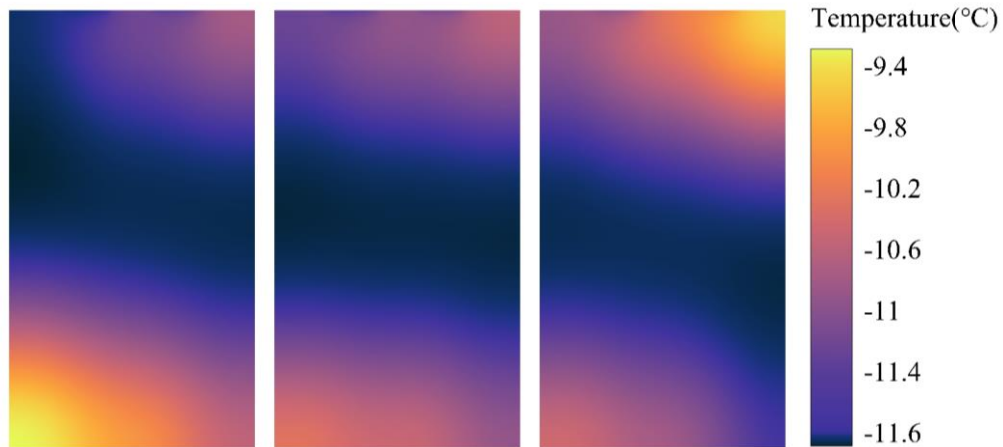
(الف)



(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  $0.0036 \text{ kg/s}$  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 تاثیری 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.

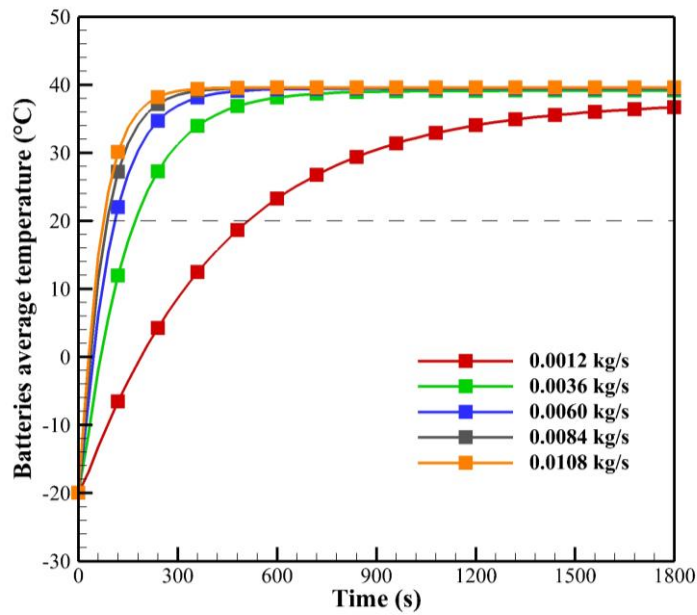
در این حالت است.

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  $0.0036 \text{ kg/s}$  کیلوگرم، اختلاف دما حداکثر است. شکل ۱۲ توزیع دما در این حالت را نشان می‌دهد.

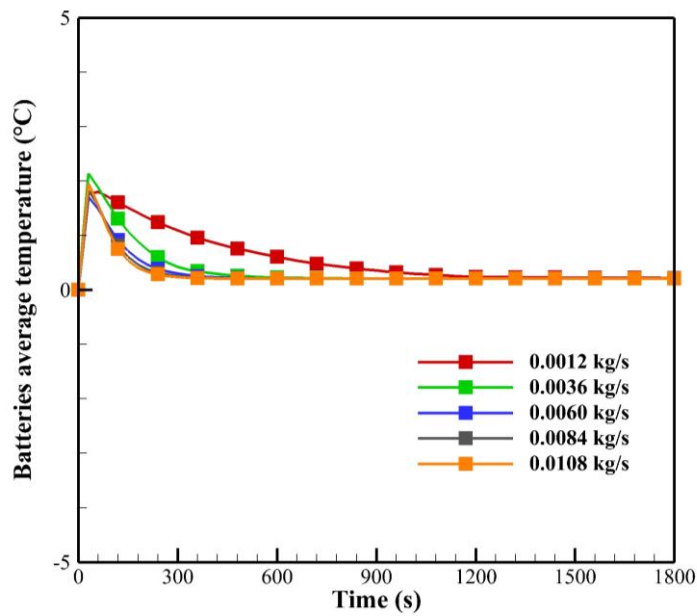
#### ۴- نتیجه‌گیری

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



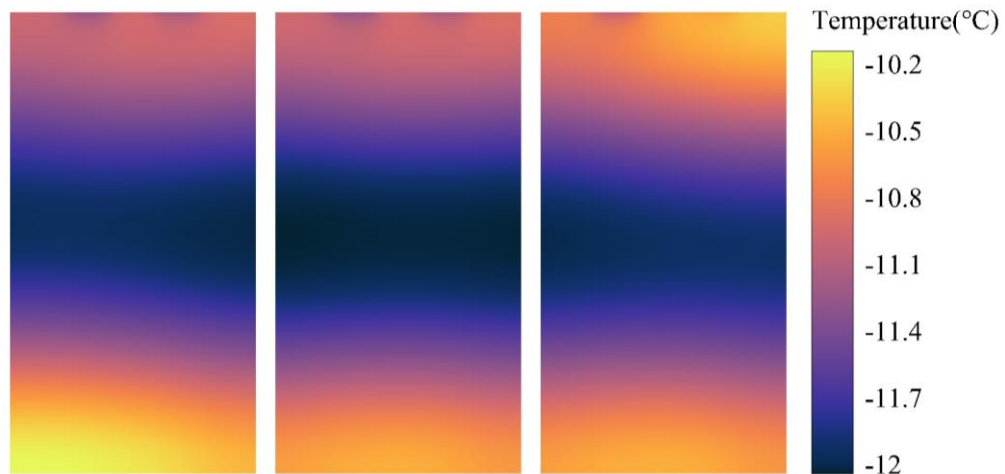
(الف)



(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<sup>۳</sup>

$R_t$  مقاومت کل باتری،  $\Omega$

$V$  ولتاژ، V

$T$  دما، K

$t$  زمان، s

### علائم یونانی

$\rho$  چگالی، kg/m<sup>۳</sup>

$v$  سرعت، m/s

$\mu$  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.



- (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)



