

Optimization of a Battery Thermal Management System Using a Microchannel Heat Sink Containing Metal Foam and Al₂O₃ Nanofluid

Amir Hossein Mosayyebi¹, Mohammad Gharehkhani², MohammadReza Hajmohammadi^{3*}

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* hajmohammadi@aut.ac.ir

Abstract

In this study, the performance of a lithium-ion battery thermal management system incorporating a microchannel heat sink with a water–Al₂O₃ nanofluid (2% volume fraction) and metal foam was investigated at discharge rates of 3C–5C. The battery consists of four series-connected cells, each with a capacity of 14.6 Ah. The cooling system comprises seven microchannels with a 2×2 mm cross-section. The battery was modeled using the multi-scale multi-domain method coupled with the Newman-Tiedemann-GU-Kim submodel. The metal foam was modeled using the Darcy-Brinkman-Forchheimer equations. The effects of metal foam length and location on performance were investigated. The results showed that relocating the metal foam toward the end of the microchannels reduced the maximum battery temperature and temperature difference by up to 9% and 48% relative to placement near the inlet. Subsequently, the metal foam length in each microchannel was optimized using a multi-objective approach, and the design was selected using the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution method with entropy weighting. The optimized configuration reduced the maximum temperature and temperature difference by 70% and 80%, respectively, compared with the no-cooling case, and improved performance compared with the uniform foam-length configuration.

Keywords: Lithium-ion battery, Microchannel heat sink, Metal foam, Al₂O₃ nanofluid, Cooling plate.

1. Introduction

Batteries have emerged as critical energy storage technologies in modern energy systems[1]. However, their performance, capacity, and lifespan are highly dependent on operating temperature, as deviations from the optimal thermal range accelerate degradation and reduce efficiency [2]. Consequently, developing effective battery thermal management systems (BTMSs) has attracted significant research attention [3]. Nanofluids have been widely investigated for battery cooling, as adding highly conductive nanoparticles to conventional base fluids enhances heat transfer [4]. Metal foams have also emerged as an effective cooling enhancement technique by disturbing fluid flow and increasing the effective heat transfer area, thereby lowering maximum temperatures and improving thermal uniformity [5]. Previous studies [6-9] have primarily focused on metal foam properties such as porosity, material, and to some extent, foam length; however, the effect of metal foam location within microchannels remains underexplored. Furthermore, existing literature generally applies a uniform foam length across all microchannels. Given the non-uniform distribution of heat generation and temperature across battery cells, using identical foam lengths in every microchannel is thermally and hydraulically sub-optimal. To address these gaps, this study investigates the effects of both metal foam length and placement on the thermal and hydraulic performance of a nanofluid-based BTMS. Unlike previous work, the metal foam length in each microchannel is treated as an independent design variable to accommodate the localized thermal requirements of different battery regions. Finally, a multi-criteria decision-making approach is employed to identify the optimal configuration by balancing maximum temperature reduction, thermal uniformity, and pressure-drop constraints.

2. Methodology

The investigated BTMS consists of four series pouch cells (each 14.6 Ah, 145 × 192 × 4.5 mm) and three aluminum microchannel heat sinks (MCHSs), each with seven square channels (2 × 2 mm). The battery considered in this study has the same properties as those reported in [10]. The computational grid consists of 2.1 million structured hexahedral cells. Within the multi-scale multi-domain (MSMD) framework, The electrode potentials ϕ_+ and ϕ_- in the active region are solved as[11]:

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -j_{\text{electrochemical}} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{\text{electrochemical}} \quad (2)$$

The reaction current density $j_{\text{electrochemical}}$ and heat source Q_b and $Q_{\text{electrochemical}}$ are computed via the NTGK submodel [11]:

$$\dot{Q}_b = (\sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2) + \dot{Q}_{\text{electrochemical}} \quad (3)$$

$$j_{\text{electrochemical}} = \frac{Q_{\text{nominal}}}{Q_0 \text{Vol}} Y[U - V] \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{\text{electrochemical}} = j_{\text{electrochemical}} \left[U - V - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (5)$$

The values of the coefficients of the U and Y functions are reported in [11]:

The aluminum foam (porosity $\varepsilon = 0.46$, permeability $K=10^{-10} \text{ m}^2$, inertial coefficient $C_F = 0.475$, pore diameter $d_p=211 \text{ }\mu\text{m}$, and specific surface area $a_{sf} = 1.5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$) is modeled using Darcy-Brinkman-Forchheimer and local thermal non-equilibrium (LTNE) formulations [9]. The water-Al₂O₃ nanofluid (volume fraction $\phi = 0.02$) is treated as a single-phase mixture with effective properties reported in [12].

The transient laminar conservation equations are solved.

For the metal foam[6]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{\mu_{nf}}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} - \frac{\mu_{nf}}{K} \vec{V} - \frac{\rho_{nf} C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (7)$$

Thermal interaction in the foam is modeled using LTNE [6]:

$$\varepsilon \rho_{nf} C_{p,nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + \rho_{nf} \nabla \cdot (\vec{V} T_{nf}) = \varepsilon k_{nf} \nabla^2 T_{nf} + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf}) \quad (8)$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \underbrace{(1 - \varepsilon) k_{nf}}_{k_{eff,s}} \nabla^2 T_s - h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf}) \quad (9)$$

For the solid heat sink[13]:

$$\rho_{hs} C_{p,hs} \frac{\partial T_{hs}}{\partial t} = k_{hs} \nabla^2 T_{hs} \quad (10)$$

Natural convection with $h = 7 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ and $T_{amb} = 298.15 \text{ K}$ is applied to external surfaces. Numerical simulations were performed in ANSYS Fluent 25.1.

3. Discussion and Results

3.1. Validation

The numerical model was validated against three previous studies. The predicted battery temperature and voltage were in good agreement with the numerical results reported by Xu et al. [10] and Mazhar et al. [14] with maximum relative errors of 7% and 1%, respectively. For the metal foam, the predicted pressure drop and Nusselt number showed good agreement with the experimental results of Hetsroni et al. [15] with maximum relative error of 11.5% and 12%, respectively. Similarly, the predicted nanofluid friction factor and thermal resistance agreed well with the results reported by Ho et al. [16], with maximum relative errors of 6.5% and 9%, respectively. Overall, these comparisons demonstrate the reliability and satisfactory accuracy of the developed numerical model.

3.2 Impact of Metal Foam Length and Position

To investigate the effect of metal foam length on the thermal performance of the battery, metal foams with lengths ranging from 20 to 140 mm were uniformly inserted into the microchannel. As shown in Figure 1, increasing the foam length consistently reduces T_{max} . The 140 mm foam reduces T_{max} by approximately 42% (5 K) compared with the case without metal foam and by 76% (21 K) compared with the uncooled case. However, ΔT_{max} decreases with foam length up to approximately 110 mm and then increases, indicating reduced thermal uniformity at longer foam lengths. Furthermore, increasing the foam length from 20 to 140 mm increases the pressure drop by approximately eightfold, while the thermal performance improves by only about 37%. To investigate the effect of metal foam location, a fixed foam length of 50 mm was positioned at distances of 10, 30, 50, 70, and 90 mm from the microchannel inlet. As shown in Figure 2, moving the foam farther from the inlet reduces T_{max} by up to 9.25% (0.94 K) and increases T_{min} by up to 22% (1.25 K). Consequently, shifting the foam location from 10 to 90 mm reduces ΔT_{max} by up to 48% (2.17

K), resulting in improved temperature uniformity with a negligible effect on pumping power.

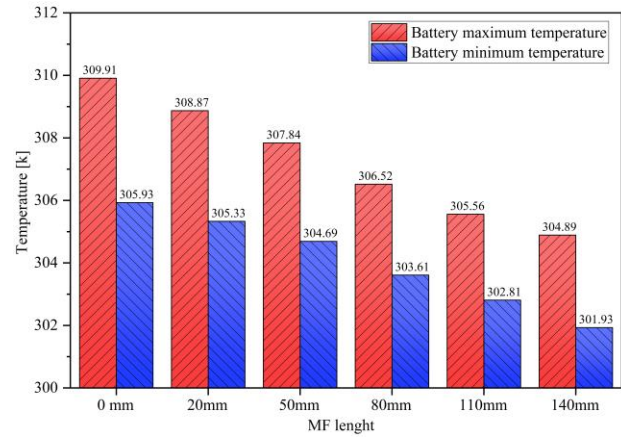


Figure 1. T_{max} and T_{min} for different metal foam lengths at the end of the discharge process for a Re_{inlet} of 100.

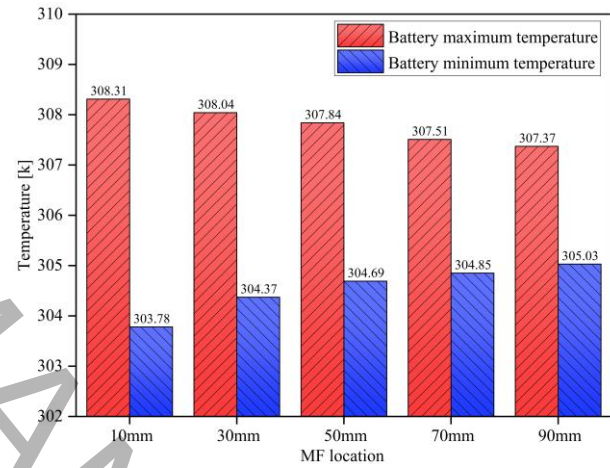


Figure 2. T_{max} and T_{min} for different metal foam locations at the end of the discharge process for a Re_{inlet} of 100.

3.3. Multi-Objective Optimization

To exploit the localized benefits of metal foam without excessive pumping penalty, multi-objective optimization was performed. The foam lengths in each of the seven microchannels (L_1 to L_7) were defined design variables. Latin Hypercube Sampling and TOPSIS method coupled with Entropy weight determination is used for optimization. The optimal design yielded foam lengths of:

$$L_1 = 10 \text{ mm}, L_2 = 99 \text{ mm}, L_3 = 114 \text{ mm}, L_4 = 122 \text{ mm}, L_5 = 53 \text{ mm}, L_6 = 7 \text{ mm}, L_7 = 106 \text{ mm}$$

This customized distribution of metal foam lengths resulted in $\Delta P = 4492$ Pa, $\Delta T_{max} = 1.975$ K, and $T_{max} = 306.445$ K (a 70% reduction in T_{max} and an 80% improvement in ΔT_{max} compared to the uncooled system). Compared with the vertical microchannel design of Fu et al. [8] under identical

conditions, the proposed design provides a 1.9% greater reduction in T_{max} , more than twice improvement in ΔT_{max} (80.5% vs. 37.8%), and over 50% lower pressure drop, demonstrating the effectiveness of tailoring the cooling capacity of individual channels to the local heat distribution.

Conclusions

In this study, a transient numerical model of a BTMS combining water-Al₂O₃ nanofluid and non-uniform aluminum metal foam inserts was developed and optimized. Shifting a 50 mm metal foam block toward the microchannel outlet reduces T_{max} by 9.2% and ΔT_{max} by 48% with negligible hydraulic penalty. Treating the foam lengths in the microchannels as designed variables, multi-objective TOPSIS optimization yielded a customized cooling structure that reduced T_{max} by 70% and ΔT_{max} by 80.5% compared to uncooled conditions.

References

- [1] Z. Chen, Y. Qin, Z. Dong, J. Zheng, Y. Liu, Numerical study on the heat generation and thermal control of lithium-ion battery, *Applied Thermal Engineering*, 221 (2023) 119852.
- [2] M. Ding, X. Feng, Y. Peng, J. Tong, B. Hou, Y. Xing, W. Zhang, L. Wang, Y. Wu, J. Lv, Electrolyte induced synergistic construction of cathode electrolyte interphase and capture of reactive free radicals for safer high energy density lithium-ion battery, *Journal of Energy Chemistry*, 87 (2023) 207-214.
- [3] O.A. Alvarez, C.M. Da Silva, C.H. Amon, A 3D electrochemical-thermal coupled model for pouch-type lithium-ion batteries with counter-tab configuration, *Energy Advances*, (2026).
- [4] S.S. Thakur, S.S. Chandel, A. Kakoria, S. Sinha-Ray, Enhancement in pool boiling heat transfer of ethanol and nanofluid on novel supersonic nanoblown nanofiber textured surface, *Experimental Heat Transfer*, 35(4) (2022) 516-532.
- [5] K. Qian, J. Sun, Y. Chen, Z. Nie, Simulation of the flow and heat transfer characteristics of open-cell metal foams: Two jet impingement heat sinks, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 115 (2025) 109890.
- [6] H. Choi, Y. Jun, H. Chun, H. Lee, Comprehensive feasibility study on metal foam use in single-phase immersion cooling for battery thermal management system, *Applied Energy*, 375 (2024) 124083.
- [7] Z. Fu, W. Zuo, Q. Li, K. Zhou, Y. Huang, Y. Li, Performance enhancement studies on the liquid cooling plate fully filled with porous medium for thermal management of lithium-ion battery pack, *Journal of Energy Storage*, 116 (2025) 116072.
- [8] Z. Fu, W. Zuo, Q. Li, K. Zhou, Y. Huang, Y. Li, Multi-objective optimization of liquid cooling plate partially filled with porous medium for thermal management of lithium-ion battery pack by RSM, NSGA-II and TOPSIS, *Energy*, 318 (2025) 134853.
- [9] M. Rabiei, A. Gharehghani, A.M. Andwari, Enhancement of battery thermal management system using a novel structure of hybrid liquid cold plate, *Applied Thermal Engineering*, 232 (2023) 121051.
- [10] Y. Xu, J. Shi, X. Nie, X. Liu, G. Liu, Design and thermal performance analysis of a novel dual-layer cascade phase change battery thermal management system, *Journal of Energy Storage*, 100 (2024) 113611.
- [11] C. Kök, A. Alkaya, Investigation of thermal behavior of lithium-ion batteries under different loads, *European Mechanical Science*, 4(3) (2020) 96-102.
- [12] S. Aminossadati, A. Raisi, B. Ghasemi, Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46(10) (2011) 1373-1382.
- [13] 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.
- [14] M. Hussain, M.K. Khan, M. Pathak, Thermal analysis of phase change material encapsulated li-ion battery pack using multi-scale multi-dimensional framework, *Journal of Energy Storage*, 65 (2023) 107290.
- [15] G. Hetsroni, M. Gurevich, R. Rozenblit, Sintered porous medium heat sink for cooling of high-power mini-devices, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27(2) (2006) 259-266.
- [16] C.-J. Ho, L. Wei, Z. Li, An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3) (2010) 96-103.

بهینه‌سازی سیستم مدیریت حرارتی باتری با استفاده از میکروکانال جاذب حرارت حاوی فوم فلزی و نانوسیال Al_2O_3

امیرحسین مصیبی، محمد قره‌خانی، محمدرضا حاج‌محمدی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* hajmohammadi@aut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، عملکرد یک سیستم مدیریت حرارتی باتری لیتیوم-یون مبتنی بر میکروکانال جاذب حرارت حاوی نانوسیال آب- Al_2O_3 (کسر حجمی ۲٪) و فوم فلزی، در نرخ‌های تخلیه شارژ $3C-5C$ به صورت عددی بررسی شده است. سیستم باتری شامل چهار سلول با ظرفیت ۱۴/۶ آمپرساعت که به صورت سری متصل شده است. سیستم خنک‌کاری شامل هفت میکروکانال افقی با مقطع 2×2 میلی‌متر است. مدل‌سازی باتری با روش چندمقیاسی-چنددامنه‌ای و زیرمدل نیومن-تیدمن-گو-کیم انجام و فوم فلزی بر پایه معادلات داریسی-برینکمن-فورشه‌ایمر شبیه‌سازی شده است. در ابتدا، اثر طول و محل قرارگیری فوم فلزی بر عملکرد سیستم مدیریت حرارتی باتری بررسی شده است. مطابق نتایج، انتقال فوم فلزی به انتهای میکروکانال، بدون افزایش محسوس افت فشار، باعث کاهش حداکثر دمای باتری تا ۹٪ و بیشینه اختلاف دما تا ۴۸٪ نسبت به قرارگیری فوم در نزدیکی ورودی می‌شود. در ادامه، طول فوم فلزی در هر میکروکانال به عنوان متغیر مستقل در بهینه‌سازی چندهدفه تعریف و طرح برتر با روش تاپسیس و وزن‌دهی آن‌تروپی انتخاب گردید. مطابق نتایج بهینه‌سازی، طول متفاوت فوم فلزی در هر میکروکانال، حداکثر دما و بیشینه اختلاف دمای باتری را به ترتیب ۷۰٪ و ۸۰٪ نسبت به حالت بدون خنک‌کاری کاهش داده و عملکرد سیستم را در مقایسه با طول‌های برابر به طور محسوسی بهبود می‌دهد.

کلمات کلیدی

باتری لیتیوم-یون، میکروکانال جاذب حرارت، فوم فلزی، نانوسیال Al_2O_3 ، صفحه خنک‌کن.

امروزه، به منظور کاهش پیامدهای گرمایش جهانی، حرکت به سوی آینده‌ای پاک و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، دستیابی به منابع انرژی سبز بیش از هر زمان دیگری ضروری است [۱]. در این راستا، باتری‌ها به عنوان اصلی‌ترین سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، نقش اساسی ایفا می‌کنند. در میان انواع باتری‌ها، باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل چگالی انرژی بالا، وزن کم و نرخ خودتخلیه پایین، به طور گسترده در صنایع مختلف، به ویژه در حوزه حمل‌ونقل و خودروهای برقی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. با این حال، عملکرد این باتری‌ها به شدت به دمای کاری آن‌ها وابسته است. انحراف از محدوده دمایی بهینه می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت قابل استفاده، افت راندمان، تسریع فرآیندهای تخریب و کاهش طول عمر شود و در نهایت شرایط خطرناکی نظیر فرار حرارتی^۱ را ایجاد کند [۳، ۲]. فرار حرارتی فرآیندی زنجیره‌ای و گرمازا است که در اثر وقوع واکنش‌های خودتشدیدشونده در داخل باتری رخ می‌دهد. این فرآیند با افزایش سریع دمای داخلی آغاز شده می‌شود و موجب تشدید واکنش‌های الکتروشیمیایی و تجزیه مواد داخلی باتری شده و نرخ تولید گرما را به طور پیوسته افزایش می‌دهد. تداوم این چرخه سبب افزایش شدید دمای باتری و آزاد شدن حجم قابل توجهی از گازهای قابل اشتعال می‌شود و احتمال وقوع انفجار و آتش‌سوزی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۴]. از دیدگاه مدیریت حرارتی، دو پارامتر کلیدی برای ارزیابی عملکرد باتری مطرح هستند: حداکثر دمای باتری و بیشینه اختلاف دمای درون سلول. محدوده دمایی قابل قبول برای باتری‌های لیتیوم-یون معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است؛ با این حال، در صورت نبود یک سیستم مدیریت حرارتی مناسب، دمای باتری حتی در شرایط عادی نیز می‌تواند از ۶۰ درجه سانتی‌گراد فراتر برود. علاوه بر این، اگر اختلاف دمای درون سلول از ۵ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند، توزیع جریان غیریکنواخت شده و عدم تعادل الکتروشیمیایی ایجاد می‌شود که در نتیجه آن عمر مفید باتری کاهش می‌یابد. بنابراین، استفاده از یک سیستم مدیریت حرارتی^۲ کارآمد برای تضمین عملکرد ایمن و پایدار باتری ضروری است [۵، ۶]. نخستین گام در طراحی یک سیستم مدیریت حرارتی کارآمد، مدل‌سازی دقیق رفتار باتری است. ساختار داخلی باتری لیتیوم-یون از اجزایی شامل الکتروود مثبت (کاتد)، الکتروود منفی (آنود)، جداکننده، الکتrolیت و جمع‌کننده‌های جریان تشکیل شده است. به دلیل ساختار چندلایه سلول و وقوع هم‌زمان فرآیندهای انتقال جرم، انتقال بار، انتقال حرارت و واکنش‌های الکتروشیمیایی، مدل‌سازی رفتار باتری یک مسئله چندفیزیکی و پیچیده محسوب می‌شود. از این رو، مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی حرارتی و الکتروشیمیایی باتری‌های لیتیوم-یون توسعه یافته‌اند [۷، ۸]. مدل‌های الکتروشیمیایی، واکنش‌های شیمیایی داخل باتری را توصیف کرده و انتقال یون‌های لیتیوم را شبیه‌سازی می‌کنند. در مقابل، مدل‌های الکتریکی از مجموعه‌ای از اجزای الکتریکی برای تشکیل شبکه مدار استفاده می‌کنند. همچنین مدل‌های حرارتی برای تحلیل تولید گرما توسعه یافته‌اند [۷]. یکی دیگر از روش‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی باتری‌های لیتیوم-یون، مدل چندمقیاسی - چنددامنه‌ای^۳ است. این چارچوب با ادغام مدل‌های الکتروشیمیایی و حرارتی در مقیاس‌های مختلف، امکان پیش‌بینی رفتار الکتروحرارتی باتری را فراهم می‌کند و در مقایسه با مدل‌های فیزیک مبنا که نیازمند حل جزئیات فرآیندهای انتقالی در ساختار متخلخل الکتروود هستند، مدل چندمقیاسی - چنددامنه‌ای با ساده‌سازی برخی فرآیندهای داخلی، هزینه محاسباتی را کاهش داده و در عین حفظ دقت قابل قبول، برای شبیه‌سازی باتری‌ها در مقیاس سلول و بسته باتری مناسب هستند [۹]. سه زیرمدل پرکاربرد این مدل عبارت است از: زیرمدل شبه‌دوبعدی نیومن^۴، زیرمدل مدار معادل^۵ و زیرمدل نیومن-تیدمن-گو-کیم^۶ [۱۰]. زیرمدل شبه‌دوبعدی نیومن حرکت یون‌های لیتیوم بین الکتروودها را توصیف می‌کند و عمدتاً در مطالعات بنیادی کاربرد دارد، اما به دلیل هزینه محاسباتی بالا، برای تحلیل حرارتی بسته‌های باتری صنعتی چندان مناسب نیست [۷]. زیرمدل مدار معادل، باتری را به صورت یک مدار الکتریکی معادل در نظر می‌گیرد و تغییرات ولتاژ را بر اساس روابط مدار و به عنوان تابعی از وضعیت شارژ^۷ محاسبه می‌کند. گرچه این زیرمدل به دلیل هزینه محاسباتی پایین برای پیش‌بینی رفتار الکتریکی دینامیکی مناسب است، اما به دلیل عدم توصیف مستقیم فرآیندهای

¹ Thermal runaway

² Battery Thermal Management System (BTMS)

³ Multi Scale - Multi Domain (MSMD)

⁴ Newman Pseudo-Two-Dimensional model (P2D)

⁵ Equivalent Circuit Model (ECM)

⁶ Newman, Tiedemann, GU, Kim (NTGK)

⁷ State of Charge (SOC)

الکتروشیمیایی داخلی، توانایی محدودی در پیش‌بینی دقیق توزیع حرارت دارد [۸]. زیرمدل نیومن-تیدمن-گو-کیم با استفاده از روابط نیمه‌تجربی بین جریان، ولتاژ و تولید حرارت، امکان شبیه‌سازی رفتار الکتروحرارتی باتری را با هزینه محاسباتی کمتر فراهم می‌کند [۱۱]. آبیشک و همکاران^۱ [۱۲] عملکرد هر دو مدل شبه‌دوبعدی نیومن و نیومن-تیدمن-گو-کیم را برای شبیه‌سازی رفتار باتری لیتیوم‌یون مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل شبه‌دوبعدی نیومن به دلیل حل جزئیات فرآیندهای الکتروشیمیایی داخلی، توانایی بالاتری در پیش‌بینی فرآیندهای داخلی سلول و موقعیت نقاط داغ دارد. با این حال، مدل نیومن-تیدمن-گو-کیم با وجود ساده‌سازی فرآیندهای داخلی، توانست توزیع دما و گرادیان‌های حرارتی را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند و به دلیل هزینه محاسباتی کمتر، گزینه مناسب‌تری برای شبیه‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس و کاربردهای مهندسی باشد. هاریداسان و همکاران^۲ [۱۳] با هدف ایجاد ارتباط بین مدل فیزیک مبنا دوپل-فولر-نیومن^۳ (از خانواده شبه‌دوبعدی نیومن) و نیمه تجربی نیومن-تیدمن-گو-کیم، چارچوبی ارائه کردند. مدل دوپل-فولر-نیومن به‌عنوان یک مدل الکتروشیمیایی با دقت بالا برای تولید داده‌های مرجع و استخراج رفتار سلول تحت شرایط مختلف عملیاتی مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای مورد نیاز مدل نیومن-تیدمن-گو-کیم از آن استخراج شد. نتایج نشان داد که در صورت پارامتر دهی مناسب، مدل نیومن-تیدمن-گو-کیم تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. کالکان و همکاران^۴ [۱۴] نشان دادند که با افزایش نرخ تخلیه شارژ از ۱C به ۵C، دمای باتری تا ۵۵٪ افزایش می‌یابد و خنک‌کاری طبیعی کارایی خود را از دست می‌دهد. به همین علت استفاده از سیستم خنک‌کاری ضروری است.

به منظور مقایسه انواع سیستم‌های خنک‌کاری، حیدرشناس و همکاران^۵ [۱۵] عملکرد سیستم‌های مختلف مدیریت حرارتی شامل خنک‌کاری هوا، مایع و مواد تغییر فازدهنده را برای یک سلول لیتیوم‌یون تحت نرخ‌های تخلیه شارژ ۱C تا ۱۰C مقایسه کردند. نتایج نشان داد که خنک‌کاری هوا به دلیل ضریب انتقال حرارت پایین‌تر، در شرایط نرخ تخلیه شارژ بالا و افزایش گرما تولیدی، توانایی محدودی در کنترل دمای باتری دارد. مواد تغییر فازدهنده به دلیل ظرفیت محدود ذخیره‌سازی گرما و عدم توانایی در دفع پیوسته حرارت، اثربخشی محدودی در شرایط بارگذاری حرارتی شدید دارد. در مقابل، سیستم خنک‌کاری مایع به دلیل ضریب انتقال حرارت بالاتر، عملکرد حرارتی بهتری داشته و گزینه مناسب‌تری برای کاربردهای با نرخ تخلیه شارژ بالا محسوب می‌شود.

به‌کارگیری سیالات انتقال حرارت پیشرفته به‌جای مخلوط‌های متداول آب/گلیکول می‌تواند راهکاری موثر برای ارتقای عملکرد حرارتی سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری باشد [۱۶]. در میان گزینه‌های موجود، نانوسیالات به دلیل حضور نانوذرات با رسانندگی بالا در سیال پایه، ظرفیت انتقال حرارت را نسبت به سیالات مرسوم بهبود می‌دهند [۱۷]. وانکده و همکاران^۶ [۱۸] یک سیستم خنک‌کاری باتری حاوی نانوسیال آب- Al_2O_3 را به ازای کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال، مورد بررسی قرار داده و نشان دادند استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۱٪ می‌تواند حداکثر دمای باتری را تا ۱۹/۵۶٪ کاهش دهد که اهمیت استفاده از نانوسیالات را حتی در کسر حجمی پایین نشان می‌دهد. سلیمانی و همکاران^۷ [۱۹] سیستم مدیریت حرارتی باتری با خنک‌کاری مایع حاوی نانوسیالات CuO و Al_2O_3 را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از نانوسیال در تمامی حالت‌ها موجب بهبود انتقال حرارت نسبت به آب خالص شده و این بهبود در دبی‌های بالاتر محسوس‌تر است. همچنین نانوسیال Al_2O_3 عملکرد حرارتی و هیدرولیکی بهتری نسبت به CuO دارد. علی‌رغم بهبود عملکرد سیستم‌های خنک‌کاری حاوی نانوسیال نسبت به سیال پایه، مشکلاتی نظیر ته‌نشینی و رسوب‌گذاری نانوذرات می‌تواند موجب کاهش پایداری نانوسیال و افت عملکرد بلندمدت سیستم شود. از این رو، انتخاب کسر حجمی مناسب نانوذرات می‌تواند ضمن حفظ بهبود انتقال حرارت، احتمال بروز این مشکلات را کاهش دهد. میساله و همکاران^۸ [۲۰] به‌منظور بررسی اثر رسوب‌گذاری نانوسیال Al_2O_3 در کاربردهای مهندسی، رفتار ته‌نشینی این نانوسیال را در کسرهای حجمی ۰/۵٪ تا ۴٪، طی مدت ۲۶۰ روز بررسی کردند. نتایج نشان داد

¹ Abhishek et al

² Haridasan et al

³ Doyle-Fuller-Newman (DFN)

⁴ Kalkan et al

⁵ Heidarshenas et al

⁶ Wankhede et al

⁷ Soleymani et al

⁸ Misale et al

که با کاهش کسر حجمی نانوذرات، میزان رسوب‌گذاری به‌طور محسوسی کاهش یافته و پایداری نانوسیال بهبود می‌یابد. سرچمی و همکاران^۱ [۲۱] نشان دادند که استفاده از نانوسیال آلومینا-آب با کسر حجمی ۲٪ می‌تواند دمای بیشینه را تا ۲/۴ درجه سلسیوس کاهش دهد و یکنواختی دمای مازول باتری را نیز به میزان ۰/۶ درجه سلسیوس بهبود بخشد. بر همین اساس، در پژوهش حاضر نیز نانوسیال آلومینا-آب با کسر حجمی ۲٪ به کار گرفته شد تا از مزایای حرارتی گزارش‌شده در بیشینه بهره‌برداری شود.

استفاده از فوم فلزی در سیستم‌های خنک‌کاری باتری، به دلیل ایجاد اختلال در جریان سیال و افزایش سطح تماس مؤثر برای انتقال حرارت، می‌تواند موجب کاهش دمای بیشینه و بهبود یکنواختی دمایی باتری شود [۲۲]. از این‌رو، استفاده از فوم‌های فلزی به‌عنوان یک روش مؤثر برای ارتقای عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری در پژوهش‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است.

چوی و همکاران^۲ [۲۳] سه نوع سیستم مدیریت حرارتی باتری شامل صفحه خنک‌کننده با همرفت طبیعی، خنک‌کاری مایع بدون فوم فلزی^۳ و خنک‌کاری مایع با قرار دادن فوم آلومینیومی در کانال را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که استفاده از فوم فلزی حداکثر و بیشینه اختلاف دمای باتری را به ترتیب ۲۰٪ و ۱۷٪ کاهش می‌دهد. با این حال، استفاده از فوم فلزی معمولاً با افزایش افت فشار همراه است. ربیعی و همکاران^۴ [۲۴] یک سیستم مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر صفحه خنک‌کننده مایع را بررسی کردند. در این پژوهش، عملکرد چندین پیکربندی مختلف شامل میکروکانال با دیواره موج‌دار، میکروکانال مستقیم کاملاً پرشده با فوم فلزی و استفاده موضعی از یک لایه فوم فلزی در مجاورت دیواره‌های میکروکانال مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از میکروکانال موج‌دار، بسته به دامنه موج، موجب کاهش حدود ۴ تا ۶ کلوین در دمای بیشینه باتری می‌شود. همچنین، به‌کارگیری فوم فلزی کاملاً تعبیه‌شده در میکروکانال توانست دمای بیشینه باتری را در مقایسه با میکروکانال مستقیم حدود ۱۴ کلوین کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده موضعی از یک لایه فوم فلزی در نزدیکی دیواره کانال نیز با وجود مقدار کمتر ماده متخلخل، موجب کاهش حدود ۴ کلوین در دمای بیشینه باتری شد. فو و همکاران^۵ [۲۵] یک سیستم مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر میکروکانال کاملاً پرشده با فوم فلزی را بررسی کردند و اثر پارامترهای ساختاری فوم، شامل تخلخل و جنس ماده متخلخل را بر عملکرد حرارتی سیستم ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که کاهش تخلخل فوم فلزی موجب کاهش دمای بیشینه باتری می‌شود، اما این بهبود حرارتی با افزایش افت فشار همراه است. همچنین، فوم مسی به جهت هدایت حرارتی بالاتر مس، در مقایسه با فوم آلومینیومی عملکرد حرارتی بهتری از خود نشان داد. با این حال، استفاده از فوم مسی به دلیل چگالی بیشتر، می‌تواند موجب افزایش وزن سیستم مدیریت حرارتی شود. در پژوهش دیگر توسط فو و همکاران^۶ [۲۶] بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم مدیریت حرارتی باتری با خنک‌کاری مایع حاوی فوم فلزی را در نرخ تخلیه شارژ ۴C انجام دادند. پارامترهای طراحی شامل طول پرشدگی محیط متخلخل در میکروکانال و سرعت ورودی و اهداف بهینه‌سازی شامل حداکثر دمای باتری، بیشینه اختلاف دمای باتری و افت فشار بودند. نتایج نشان داد که استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره^۷ منجر به دستیابی به حداکثر دما ۳۱/۲۹ درجه سانتی‌گراد، بیشینه اختلاف دمای ۴/۹۷ درجه سانتی‌گراد و افت فشار ۳۰ کیلوپاسکال می‌شود.

در مطالعات پیشین، اثر پارامترهای مختلف فوم فلزی، از جمله تخلخل، جنس و تا حدودی طول فوم فلزی بر عملکرد حرارتی سیستم مدیریت حرارتی باتری بررسی شده است. با این حال، تأثیر موقعیت قرارگیری فوم فلزی در میکروکانال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین با وجود پیشرفت‌های گزارش‌شده در استفاده از فوم فلزی در سامانه‌های مدیریت حرارتی باتری، در مطالعات پیشین، طول ناحیه متخلخل در تمامی کانال‌ها به‌صورت یکسان در نظر گرفته شده است [۲۴، ۲۶]. این فرض در حالی اتخاذ شده که توزیع دما و نرخ تولید حرارت در سطح باتری یکنواخت نیست و در نتیجه، نیاز حرارتی نواحی مختلف تفاوت محسوسی با یکدیگر دارد. از سوی دیگر، اگرچه حضور فوم فلزی موجب تقویت انتقال حرارت می‌شود، اما هم‌زمان افت فشار را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، استفاده از طول یکسان فوم در تمام میکروکانال‌ها لزوماً راهکار بهینه‌ای برای ایجاد موازنه بین عملکرد حرارتی و هیدرولیکی نیست. بر این اساس، خلأ

¹ Sarchami et al

² Choi et al

³ Metal Foam (MF)

⁴ Rabiei et al

⁵ Fu et al

⁶ Fu et al

⁷ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

اصلی پژوهش حاضر در عدم بررسی امکان تعریف طول مستقل فوم فلزی در هر میکروکانال به منظور انطباق موضعی ظرفیت خنک کاری با توزیع غیریکنواخت بار حرارتی باتری نهفته است. در این پژوهش، یک سامانه مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر جریان نانوسیال آب- Al_2O_3 با کسر حجمی ۰/۰۲ بررسی شده است. به منظور پیش‌بینی دقیق توزیع دما و حرارت تولیدی در سلول‌های باتری، مدل‌سازی الکتروشیمیایی-حرارتی باتری لیتیوم‌یون با استفاده از مدل چندمقیاسی-چنددامنه‌ای و زیرمدل نیومن-تیدمن-گو-کیم انجام شده و به منظور بهبود عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کاری، فوم آلومینیومی درون میکروکانال‌های خنک‌کننده قرار داده شده است. در این پژوهش، بدون اعمال تغییر اساسی در ساختار کلی سیستم، طول فوم در هر میکروکانال به عنوان یک متغیر طراحی مستقل در نظر گرفته می‌شود تا با ایجاد موازنه‌ای مناسب میان کاهش دمای بیشینه، بهبود یکنواختی دما و محدودسازی افت فشار، بهترین آرایش سیستم از میان حالت‌های مورد بررسی، از طریق یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره، تعیین شود.

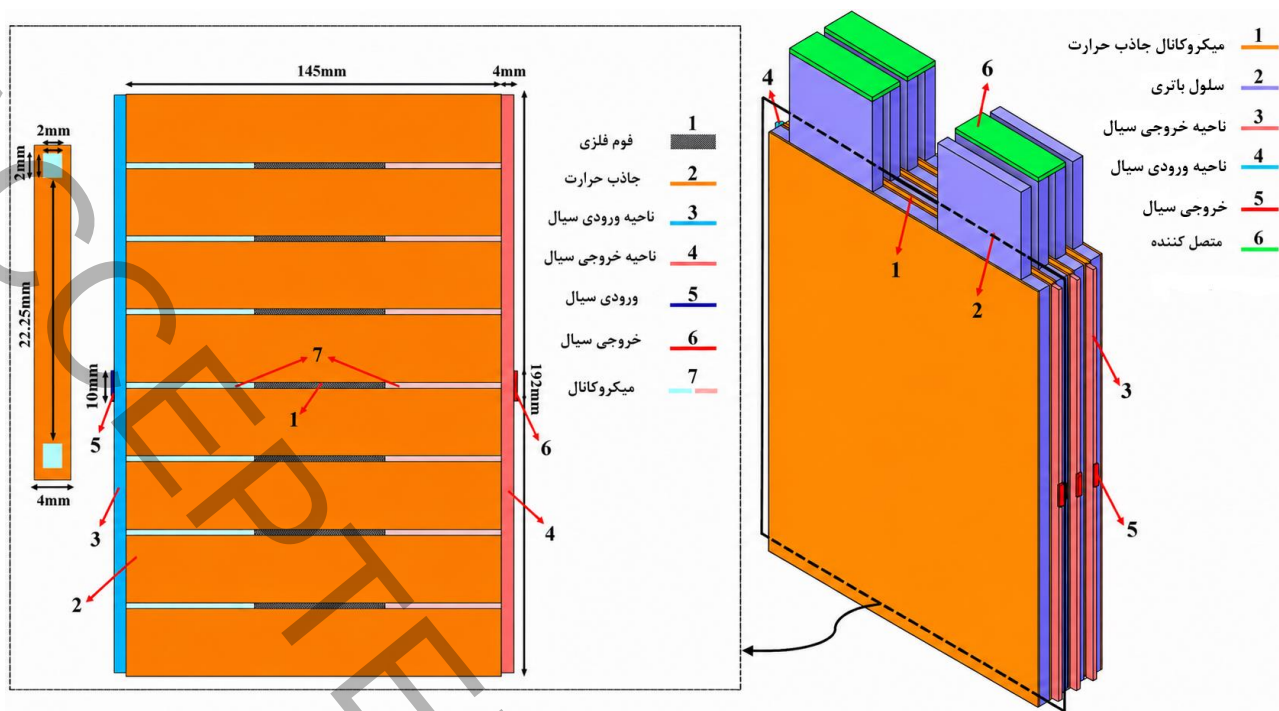
۲- الگوسازی نظری

۲-۱- تعریف مسئله و شبکه‌بندی مورد استفاده

سیستم مدیریت حرارتی باتری مورد بررسی شامل چهار سلول باتری متصل به صورت سری و سه میکروکانال جاذب حرارت است که بین سلول‌های باتری قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نمای شماتیک مجموعه باتری و سیستم مدیریت حرارتی آن را نشان می‌دهد. میکروکانال جاذب حرارت از جنس آلومینیوم بوده و شامل هفت میکروکانال با مقطع مربعی است که ابعاد هندسی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. شبکه محاسباتی مورد استفاده از حدود ۲/۱ میلیون سلول محاسباتی با ساختار سازمان‌یافته تشکیل شده و دو ناحیه جامد و سیال را در بر می‌گیرد. ناحیه جامد شامل سلول‌های باتری و جاذب حرارت است، در حالی که ناحیه سیال شامل میکروکانال‌ها و فوم فلزی است. برای ناحیه سیال، شبکه‌ای سازمان‌یافته از نوع شش‌وجهی^۱ با ابعاد $182 \times 17 \times 17$ در سه راستا تولید شده و لایه مرزی آن با استفاده از ضریب بایاس^۲ ۵ ایجاد شده است. شکل ۲ نمایی از شبکه محاسباتی به کاررفته در این پژوهش را نشان می‌دهد.

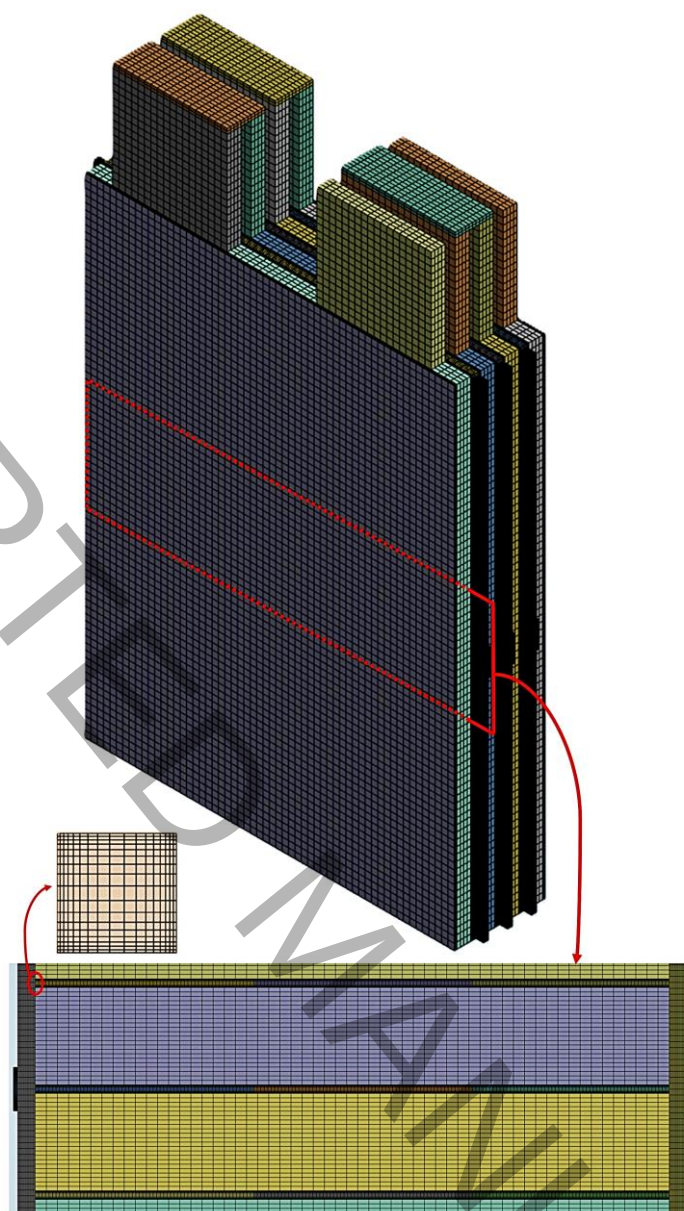
¹ Hexahedral

² Bias factor



شکل ۱: نمای شماتیک مجموعه باتری و میکروکانال جاذب حرارت مورد استفاده در سیستم مدیریت حرارتی باتری

Figure 1. Schematic view of the battery pack and the microchannel heat sink used in the battery thermal management system.



شکل ۲: نمای شماتیک شبکه بندی محاسباتی مورد استفاده در پژوهش حاضر
Figure 2. Schematic view of the computational mesh used in the present study

۲-۲- مدل سازی باتری

باتری لیتیوم-یون مورد استفاده در این پژوهش، دارای خواص مشابه با باتری مورد استفاده در پژوهش یو و همکاران^۱ [۲۷] است و پارامترهای عملکردی و هندسی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل سازی عددی باتری با استفاده از روش چندمقیاسی-چنددامنه ای انجام می شود. در این روش، باتری به دو ناحیه فعال و غیرفعال تقسیم می شود. ناحیه فعال محل وقوع تمامی واکنش های الکتروشیمیایی و تولید انرژی است، در حالی که ناحیه غیرفعال شامل زبانه ها^۲ و متصل کننده ها بوده و وظیفه برقراری اتصال الکتریکی بین سلول ها و تعیین محل آغاز توزیع جریان در سلول را بر عهده دارد [۲۸]. از آنجا که مدل نیومن-تیدمن-گو-کیم یک مدل نیمه تجربی است، اثر فرآیندهای الکتروشیمیایی و تولید حرارت از طریق توابع مبتنی بر داده های تجربی در مدل لحاظ شده و ناحیه فعال به صورت یک محیط همگن با خواص فیزیکی و حرارتی مؤثر مدل سازی می شود. بر این اساس، همانند بسیاری از پژوهش های مبتنی بر مدل

¹ Xu et al

² Tabs

نیومن-تیدمن-گو-کیم، خواص فیزیکی و حرارتی ناحیه فعال، از جمله چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه، به صورت ثابت و یکنواخت فرض شده و ضریب هدایت حرارتی آن نیز به صورت همسانگرد، با مقدار یکسان در سه راستای اصلی، در نظر گرفته شده است [۲۷، ۲۹]. مشخصات فیزیکی و حرارتی هر یک از این دو ناحیه در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۱: پارامترهای عملکردی و هندسی هر سلول باتری [۲۷]

Table 1. Performance and geometric parameters of each battery cell [27].

نام پارامتر	مقدار	واحد
ظرفیت اسمی باتری	۱۴/۶	Ah
حداکثر ولتاژ قطع	۴/۲	V
حداقل ولتاژ قطع	۳	V
نرخ تخلیه شارژ (C)	۵-۴-۳	-
ابعاد باتری	۵/۴×۱۹۲×۱۴۵	mm

جدول ۲: خواص فیزیکی و حرارتی سلول باتری [۲۷]

Table 2. Thermophysical properties of the battery cell [27].

نام بخش	ضریب رسانندگی الکتریکی	ضریب رسانندگی حرارتی	ظرفیت گرمایی ویژه	چگالی
	$\sigma_+ \left(\frac{S}{m} \right)$	$k \left(\frac{W}{m.K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg.K} \right)$	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
ناحیه فعال	$9/83 \times 10^5$	۱۸/۲	۶۷۸	۲۰۹۲
ناحیه غیرفعال	10^7	۳۸۷/۶	۳۸۱	۸۹۷۸

معادله حرارتی روش چندمقیاسی-چنددامنه‌ای در عملکرد معمولی باتری، به صورت روابط (۱)-(۳) نوشته می‌شود که در آن σ_+ و σ_- به ترتیب رسانندگی الکتریکی مؤثر فاز جامد در الکتروود مثبت و منفی، ϕ_+ و ϕ_- پتانسیل الکتریکی در الکتروود مثبت و منفی و j چگالی جریان واکنش الکتروشیمیایی است [۲۸]. به منظور بدست آوردن حرارت الکتروشیمیایی، از زیرمدل نیومن-تیدمن-گو-کیم استفاده می‌شود که معادله حرارت تولیدی آن مطابق رابطه (۴) و چگالی جریان آن مطابق رابطه (۵) بدست می‌آید که در آن V ولتاژ باتری، $T \frac{dU}{dT}$ گرمای ناشی از تغییر آنتروپی واکنش‌های الکتروشیمیایی بین الکتروودها، Vol حجم سلول باتری، $Q_{nominal}$ ظرفیت اسمی باتری، Q_0 ظرفیت باتری است که داده‌ای تجربی از آن استخراج شده، U و Y پارامترهای تجربی هستند که از نمودار قطبیت باتری بدست می‌آیند و به صورت یک چند جمله‌ای بر حسب میزان تخلیه شارژ مطابق روابط (۶) و (۷) نوشته می‌شوند که در آن DOD میزان تخلیه شارژ، T_{abs} دمای سلول باتری، $T_{abs,0}$ دمای سلول باتری است که داده‌ای تجربی از آن استخراج شده، C_1 و C_2 ضرایب برازش وابستگی دمایی هستند و مقادیر آن‌ها در این پژوهش به ترتیب برابر ۱۸۰۰ و $-0/0095$ است [۲۸]. مقادیر ضرایب چند جمله‌ای مورد استفاده در روابط (۶) و (۷) در جدول ۳ نشان داده شده است [۲۸].

به منظور بدست آوردن ضرایب چند جمله‌ای پارامترهای تجربی U و Y ، ابتدا طی یک آزمایش تجربی در میزان تخلیه شارژهای مختلف فرآیند تخلیه شارژ انجام شده و نمودار ولتاژ باتری بر حسب چگالی جریان (نمودار قطبیت باتری) ترسیم می‌شود. در نمودار

قطبیت، به ازای هر میزان تخلیه شارژ، یک خط ترسیم می‌شود. پارامتر U برابر ولتاژ باتری در حالت مدار باز است که برابر عرض از مبدا (چگالی جریان صفر) خطوط ترسیم شده در نمودار قطبیت است و مقدار Y برابر معکوس شیب خطوط نمودار قطبیت است. نمونه‌از نمودار قطبیت باتری و نحوه استخراج پارامترهای U و Y در پژوهش گو و همکاران^۱ [۳۰] نشان داده شده است [۳۰].

$$\dot{Q}_b = \dot{Q}_{ohmic} + \dot{Q}_{electrochemical} = (\sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2) + \dot{Q}_{electrochemical} \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -j_{electrochemical} \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{electrochemical} \quad (۳)$$

$$\dot{Q}_{electrochemical} = j_{electrochemical} \left[U - V - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (۴)$$

$$j_{electrochemical} = \frac{Q_{nominal}}{Q_0 Vol} Y [U - V] \quad (۵)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^{n=5} a_n (DOD)^n \right) \exp \left\{ -C_1 \left(\frac{1}{T_{abs}} - \frac{1}{T_{abs,0}} \right) \right\} \quad (۶)$$

$$U = \left(\sum_{n=0}^{n=5} b_n (DOD)^n \right) \exp \left\{ -C_2 \left(\frac{1}{T_{abs}} - \frac{1}{T_{abs,0}} \right) \right\} \quad (۷)$$

جدول ۳: ضرایب چندجمله‌ای توابع U و Y [۲۸]

Table 3. Polynomial coefficients of the U and Y functions [28].

b_n	a_n	n
۴/۱۲	۱۱۶۸/۵۹	۰
-۰/۸۰۴	-۸۲۹۸	۱
۱/۰۷۵	۵۲۵۰۴/۶	۲
-۱/۱۷۷	-۱۳۶۲۳۱	۳
.	۱۵۸۵۳۱/۷	۴
.	-۶۷۵۷۸/۵	۵

۳-۲- مدل سازی فوم فلزی

در این پژوهش، فوم فلزی به صورت یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده و خواص آن مطابق با پژوهش ربیعی و همکاران [۲۴] انتخاب می‌شود. فوم فلزی مورد استفاده دارای تخلخل ($\varepsilon = 0.46$) و نفوذپذیری ($K = 10^{-10} \text{ m}^2$) و جنس آن از آلومینیوم است. برای محاسبه پارامترهایی مانند ضریب اینرسی (C_F)، سطح ویژه‌ی بین جامد - سیال (a_{sf}) و ضریب انتقال حرارت موضعی جامد - سیال (h_{sf}) با فرض کروی بودن ذرات، مقادیر آن با استفاده از روابط تجربی زیر بدست می‌آید. به منظور بدست آوردن ضریب اینرسی، از رابطه ارگان^۲ مطابق رابطه (۸) استفاده می‌شود [۳۱].

¹ Gu et al

² Ergun

$$C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150}} \varepsilon^{-\frac{3}{2}} \quad (8)$$

چگالی سطح ویژه بین فاز جامد و سیال با توجه به مدل ارگان^۱ از رابطه (۹) بدست می آید که در آن d_p قطر میانگین منافذ است که مطابق مدل کوزنی-کارمن^۲، از رابطه (۱۰) بدست می آید [۳۱].

$$a_{sf} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (9)$$

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (10)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت موضعی جامد - سیال در فوم فلزی رابطه (۱۱) برقرار است که در آن k_{nf} رسانندگی نانوسیال، d_h قطر هیدرولیکی منافذ است که از مطابق مدل ارگان از رابطه (۱۲) بدست می آید [۳۱] و Nu عدد ناسلت است که مقدار آن از مدل تجربی واکانو^۳ مطابق رابطه (۱۳) بدست می آید [۳۲]. در این رابطه Re_{dh} عدد رینولدز جریان عبوری و Pr عدد پرانتل است.

$$h_{sf} = \frac{Nu \cdot k_{nf}}{d_h} \quad (11)$$

$$d_h = \frac{2}{3} d_p \quad (12)$$

$$Nu = 2 + 1.1 Re_{dh}^{0.6} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

با توجه به روابط فوق، خواص مورد نیاز فوم فلزی بدست می آید که مقادیر آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- خواص فوم فلزی مورد استفاده [۳۲، ۳۱، ۲۴]

Table 4. Properties of the metal foam used [24, 31, 32].

قطر هیدرولیکی	میانگین قطر منافذ	ضریب انتقال حرارت موضعی جامد و سیال	چگالی سطح ویژه بین جامد و سیال	ضریب اینرسی	نفوذ پذیری	تخلخل
$d_h (\mu m)$	$d_p (\mu m)$	$h_{sf} \left(\frac{W}{m^2.K} \right)$	$a_{sf} (m^{-1})$	C_F	$K (m^{-2})$	ε
۱۴۱	۲۱۱	$2 \times 10^4 - 10^5$	$1/5 \times 10^4$	۰/۴۷۵	۱۰-۱۰	۰/۴۶

۴-۲- مدل سازی نانوسیال

در این پژوهش، نانوسیال با استفاده از رویکرد تک فازی همگن مدل سازی شده است که در آن فرض می شود سیال پایه و نانوذرات در تعادل حرارتی هستند و با سرعت یکسانی حرکت می کنند. این رویکرد به طور گسترده برای نانوسیال های رقیق با کسر حجمی کمتر از ۰/۰۵ مورد استفاده قرار گرفته است زیرا می تواند پیش بینی های به اندازه کافی دقیقی را با هزینه محاسباتی معقول ارائه دهد [۳۳، ۳۴].

خواص مؤثر نانوسیال آب- Al_2O_3 به شرح زیر است [۳۵].

¹ Ergun

² Kozeny-Carman

³ Wakao

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_{np} \quad (14)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_{np} \quad (15)$$

ویسکوزیته دینامیکی و هدایت حرارتی نانوسیال به ترتیب با استفاده از رابطه برینکمن^۱ [۳۶] و مدل پاتل و همکاران^۲ [۳۷] به شرح زیر تعیین می‌شوند:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (16)$$

$$k_{nf} = k_f \left[1 + \frac{k_{np} A_{np}}{k_f A_f} + c k_{np} Pe \frac{A_{np}}{A_f k_f} \right] \quad (17)$$

که در آن:

$$\frac{A_{np}}{A_f} = \frac{d_f}{d_{np}} \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (18)$$

$$Pe = \frac{u_{np} d_{np} (\rho C_p)_f}{k_f} \quad (19)$$

$$u_{np} = \frac{2 \kappa_b T}{\pi \mu_f d_{np}^2} \quad (20)$$

k_b ثابت بولتمن^۳ و مقدار آن برابر $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ و C ثابت آزمایشگاهی با مقدار ۲۵۰۰۰ است. قطر مولکولی نانوذره (d_{np}) و سیال پایه (d_f) به ترتیب برابر ۴۰ نانومتر و $۰/۲$ نانومتر است.

خواص آب خالص و نانوذره آلومینا مورد نیاز در دمای $۲۹۸/۱۵$ کلین در جدول ۵ ارائه شده است [۳۵]. همچنین، خواص ترمودینامیکی نانوسیال که با جایگذاری مقادیر در روابط فوق بدست آمده‌اند و خواص فلز آلومینیوم که در بخش جاذب حرارت از آن استفاده شده است، در جدول مذکور بیان شده است.

جدول ۵: خواص ترموفیزیکی آب خالص، نانوذره آلومینا، نانوسیال آب- Al_2O_3 و فلز آلومینیوم [۳۵]

Table 5. Thermophysical properties of pure water, Al_2O_3 nanoparticles, the water- Al_2O_3 nanofluid, and aluminum [35].

چگالی	ظرفیت گرمایی ویژه	ضریب رسانندگی حرارتی	ویسکوزیته	نوع ماده
$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$C_p \left(\frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right)$	$k \left(\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right)$	$\mu \left(\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)$	
۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	-	نانوذره آلومینا (Al_2O_3)
۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳	$۹/۰۹۵ \times 10^{-4}$	آب خالص (H_2O)
۱۰۵۷	۳۹۲۲	۰/۶۷۷	$۹/۵۶۶ \times 10^{-4}$	نانوسیال آب- Al_2O_3 (کسر حجمی ۲٪)
۲۷۱۹	۸۷۱	۲۰۲/۴	-	فلز آلومینیوم

¹ Brinkman

² Patel et al

³ Boltzmann constant

۵-۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

به منظور استخراج معادلات حاکم، فرضیات زیر در پژوهش فعلی، نظر گرفته شده است.

- به دلیل تغییرات دمایی محدود، خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در این پژوهش ثابت و مستقل از دما در نظر گرفته می شوند.
- با توجه به محدوده سرعت سیال، جریان به صورت تراکم‌ناپذیر و در رژیم جریان آرام در نظر گرفته می شود.
- با توجه به ماهیت عملکردی باتری، حل مسئله به صورت گذرا انجام می شود.
- باتری به عنوان یک جسم جامد همگن در نظر گرفته شده و خواص فیزیکی آن در نواحی تعریف شده ثابت و یکنواخت است.
- ضریب هدایت حرارتی بخش فعال باتری به صورت یک خاصیت همسانگرد در نظر گرفته شده و مقدار آن در هر سه راستای اصلی ثابت فرض شده است.
- فوم فلزی به صورت یک محیط متخلخل همگن مدل سازی شده است.
- اثرات شتاب گرانشی در میکروکانال‌ها به دلیل ابعاد کوچک آن‌ها نادیده گرفته شده است.

معادله حاکم بر نانوسیال شامل معادله پیوستگی و معادلات مومنوم و معادله انرژی است که در ادامه تعریف می شوند.

معادله پیوستگی با توجه به فرضیات بیان شده به صورت رابطه (۲۱) بیان می شود که در آن $\vec{V}$ بردار سرعت است [۳۸].

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0. \quad (21)$$

معادله مومنوم به صورت رابطه (۲۲) بیان می شود که در آن P فشار سیال، ρ_{nf} چگالی نانوسیال و μ_{nf} ویسکوزیته نانوسیال است [۳۸].

$$\rho_{nf} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu_{nf} \nabla^2 \vec{V} \quad (22)$$

معادله انرژی به صورت رابطه (۲۳) بیان می شود که در آن $C_{p,nf}$ ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، T_{nf} دمای نانوسیال و k_{nf} رسانندگی حرارتی نانوسیال است [۳۸].

$$\rho_{nf} C_{p,nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + \rho_{nf} \nabla \cdot (\vec{V} T_{nf}) = k_{nf} \nabla^2 T_{nf} \quad (23)$$

معادله حاکم بر فوم فلزی نیز شامل معادله پیوستگی و معادلات مومنوم و معادله انرژی است که در ادامه تعریف می شوند. معادله پیوستگی بخش فوم فلزی به صورت رابطه (۲۴) نوشته می شود [۲۳].

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_{nf})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{V}) = 0 \quad \xrightarrow{\rho_{nf} \& \varepsilon = const} \quad \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (24)$$

معادله مومنوم بخش فوم فلزی بر اساس مدل داریسی-برینکمن-فورشهیمیر به صورت رابطه (۲۵) نوشته می شود. در این رابطه جمله اول از سمت راست ترم اینرسی فورشهیمیر، جمله دوم ترم داریسی و جمله سوم ترم لزجت برینکمن است [۲۳].

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{\mu_{nf}}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} - \frac{\mu_{nf}}{K} \vec{V} - \frac{\rho_{nf} C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (25)$$

معادله انرژی بخش فوم فلزی با در نظر گرفتن شرط عدم تعادل حرارتی محلی میان بخش جامد و سیال فوم فلزی به صورت رابطه (۲۶) برای بخش سیال و رابطه (۲۷) برای بخش جامد بیان می شود [۲۳].

$$\varepsilon \rho_{nf} C_{p,nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + \rho_{nf} \nabla \cdot (\vec{V} T_{nf}) = \varepsilon k_{nf} \nabla^2 T_{nf} + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf}) \quad (26)$$

$k_{eff,nf}$

$$(1-\varepsilon)\rho_s C_{Ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \underbrace{(1-\varepsilon)k_{nf}}_{k_{eff,s}} \nabla^2 T_s - h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf}) \quad (27)$$

با توجه به اینکه جاذب حرارت یک جسم جامد است، تنها معادله حاکم بر آن، معادله انرژی است که به صورت رابطه (۲۸) بیان می‌شود. در این رابطه زیروند h_s مربوط به جاذب حرارت است [۳۸].

$$\rho_{hs} C_{Phs} \frac{\partial T_{hs}}{\partial t} = k_{hs} \nabla^2 T_{hs} \quad (28)$$

معادله حاکم بر باتری در ناحیه غیرفعال، مشابه رابطه (۲۸) است و در ناحیه فعال، معادله انرژی باتری به صورت رابطه (۲۹) بیان می‌شود. در این رابطه زیروند b مربوط به ناحیه فعال باتری است و مقدار Q_b از رابطه (۱) بدست می‌آید [۲۹].

$$\rho_b C_{Pb} \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \nabla^2 T_b + Q_b \quad (29)$$

شرایط مرزی سرعت ورودی متناظر با عدد رینولدز در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ انتخاب شده و عدد رینولدز به صورت رابطه (۳۰) تعریف می‌شود. در این رابطه D_h قطر هیدرولیکی مقطع ورودی است و مقدار آن برابر ۳/۳ میلی‌متر است.

$$Re_{inlet} = \frac{\rho_{nf} u_{inlet} D_h}{\mu_{nf}} \quad (30)$$

دمای ورودی سیال ۲۹۸/۱۵ کلوین در نظر گرفته می‌شود.

در بخش خروجی میدان جریان، شرط مرزی فشار ثابت برقرار است و فشار برابر فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. در این صورت فشار نسبی برابر صفر است.

شرط مرزی برای سطوحی که با محیط خارجی در تماس هستند، به صورت انتقال حرارت جابجایی مطابق رابطه (۳۱) برقرار است. در این رابطه n بردار نرمال بر سطح تماس، T_{amb} دمای محیط اطراف است که مقدار آن برابر ۲۹۸/۱۵ کلوین در نظر گرفته می‌شود و h ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی است که مقدار آن برابر $\frac{W}{m.K}$ است.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{amb}) \quad (31)$$

شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی باتری، به صورت دو شرط مرزی دیریکله و نیومن مطابق روابط ۳۰ و ۳۱ تعریف می‌شود که با توجه به نحوه اتصال سری باتری‌ها، شرط مرزی نیومن در سطح بالایی زبانه مثبت باتری اول و شرط مرزی دیریکله در سطح بالایی زبانه منفی باتری چهارم اعمال می‌شود و مرجع پتانسیل را تعیین می‌کند. برای سایر سطوح تماس مشترک، شرط پیوستگی پتانسیل الکتریکی و شار جریان الکتریکی برقرار است.

$$-\sigma \frac{\partial \phi_+}{\partial n} = j \quad (32)$$

$$\phi_- = 0 \quad (33)$$

شرایط اولیه مسئله، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

- دمای اولیه در کل هندسه در برابر دمای محیط است.
- سرعت اولیه تنها در بخش ورودی میدان جریان وجود دارد و برابر سرعت ورودی است که مطابق رابطه (۳۰) بدست آید و در بقیه میدان جریان، بردار سرعت برابر صفر است.
- در پژوهش عددی حاضر از حلگر فشار مبنا^۱ در حالت گذرا^۲ با گام زمانی یک ثانیه استفاده شده است. با توجه به رسیدن سریع جریان سیال به حالت شبه پایدار و باقی ماندن اثرات گذرا عمدتاً در معادله انرژی، از الگوریتم SimpleC برای کوپل فشار-سرعت

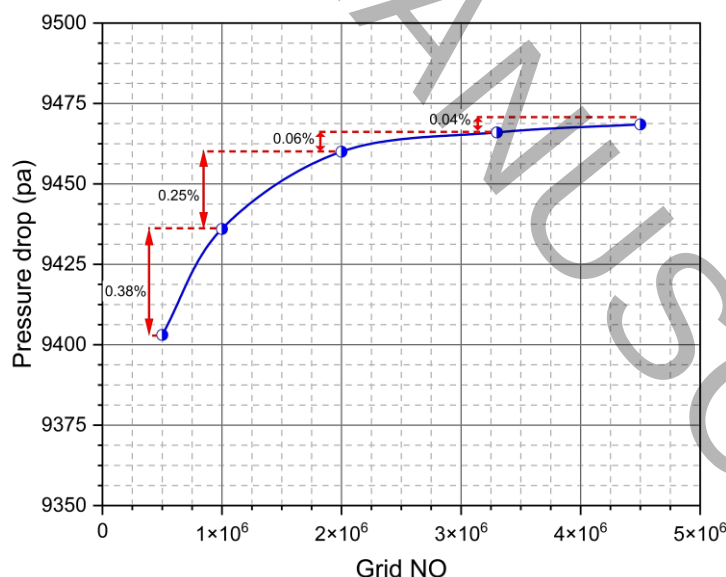
^۱ Pressure base

^۲ Transient

به منظور افزایش سرعت همگرایی استفاده شده است. با توجه به محدوده سرعت جریان، مدل آرام برای حل معادلات سیال به کار گرفته شد. گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی با روش بالادست مرتبه دوم^۱ و معادلات پتانسیل باتری با روش بالادست مرتبه اول^۲ انجام شده است. معیار همگرایی برابر با حداکثر مقدار باقیمانده کمتر 10^{-6} برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی و 10^{-9} برای معادلات پتانسیل باتری قرار داده شده است. تمامی شبیه سازی ها در بستر نرم افزار انسیس فلوئنت ۲۵/۱ انجام شده است.

۲-۶- بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی

به منظور بررسی اثر اندازه شبکه محاسباتی بر نتایج و همچنین انتخاب شبکه ای با دقت کافی و هزینه محاسباتی بهینه، نتایج حاصل از شبکه های مختلف تحت شرایط یکسان مقایسه شدند. این بررسی برای عدد رینولدز ۱۰۰ و فوم فلزی با طول ۵۰ میلی متر که در مرکز هر میکروکانال قرار دارد، برای پنج شبکه محاسباتی با تعداد سلول محاسباتی بین ۰/۵ تا ۴/۵ میلیون انجام شده است. به منظور بررسی اثر تعداد سلول شبکه محاسباتی بر عملکرد هیدرولیکی سیستم خنک کاری، شکل ۳ نمودار افت فشار بر حسب تعداد سلول شبکه محاسباتی را نشان می دهد. مطابق این شکل مشاهده می شود که با افزایش تعداد سلول شبکه محاسباتی، اختلاف نتایج افت فشار از ۰/۳۸٪ به ۰/۰۴٪ کاهش پیدا می کند. همچنین به منظور بررسی اثر تعداد سلول شبکه محاسباتی بر عملکرد حرارتی باتری، شکل ۴ نمودار حداکثر دمای باتری بر حسب تعداد سلول شبکه را نشان می دهد. مطابق این شکل مشاهده می شود که با افزایش تعداد سلول شبکه محاسباتی، اختلاف نتایج حداکثر دمای باتری از ۰/۸۸٪ به ۰/۰۶٪ کاهش پیدا می کند. با توجه به اینکه تمامی شبکه های محاسباتی از نوع سازمان یافته و شش وجهی هستند، اختلاف نتایج بین شبکه ها کم است (کمتر از ۷۰ پاسکال در افت فشار و کمتر از ۰/۵ درجه سانتی گراد در حداکثر دمای باتری). بنابراین، برای انتخاب شبکه مناسب، نیاز به ارزیابی هزینه محاسباتی هر شبکه نیز وجود دارد. سیستم محاسباتی مورد استفاده دارای محدودیت حافظه برای شبکه بندی هایی با تعداد سلول بالا (بیش از ۲/۵ میلیون سلول) است، به صورتی که با افزایش تعداد سلول شبکه محاسباتی از ۲/۱ میلیون سلول به ۴/۵ میلیون سلول، زمان محاسباتی بیش از ۳/۵ برابر می شود؛ در حالیکه که نتایج ۰/۱٪ بهبود می یابد که این افزایش، هزینه محاسباتی را توجیه نمی کند. به همین علت، شبکه محاسباتی با ۲/۱ میلیون سلول به عنوان شبکه بندی اصلی پژوهش حاضر انتخاب می شود که جزئیات این شبکه بندی پیشتر در بخش ۱-۲ بیان شده است.



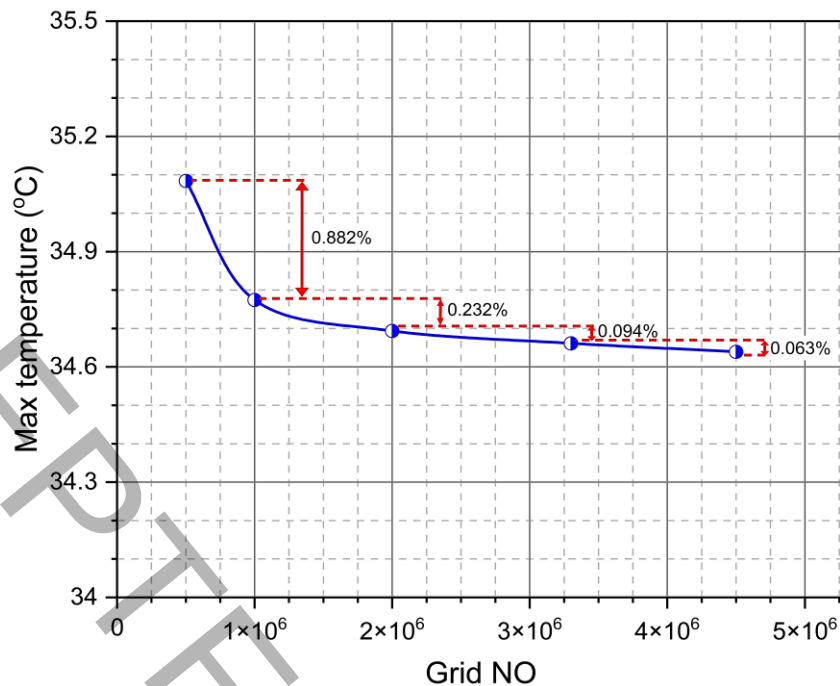
شکل ۳: اثر تعداد سلول شبکه محاسباتی بر افت فشار

Figure 3. Effect of the number of computational cells on pressure drop

¹ Second order upwind

² First order upwind

³ Ansys Fluent 25.1



شکل ۴: نمودار حداکثر دمای باتری بر حسب تعداد سلول شبکه محاسباتی

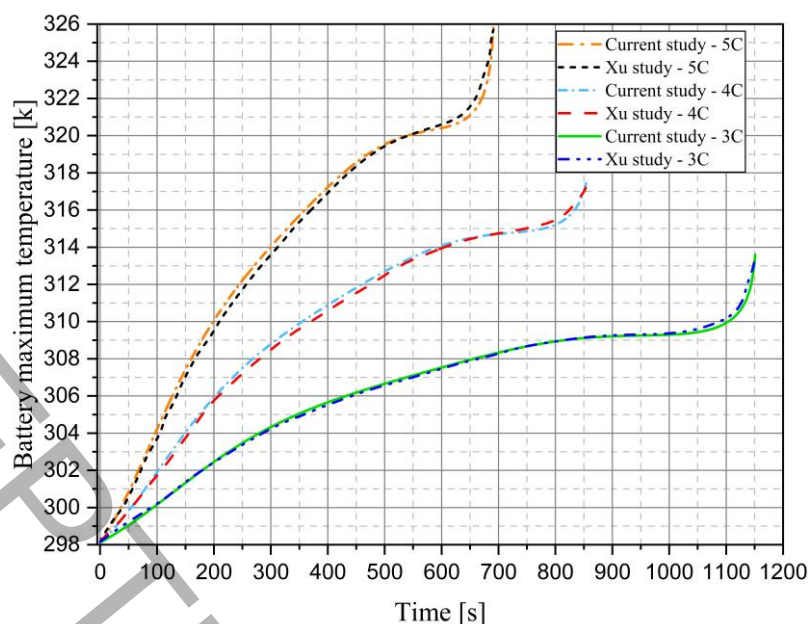
Figure 4. Effect of the number of computational cells on the maximum battery temperature

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی حل عددی

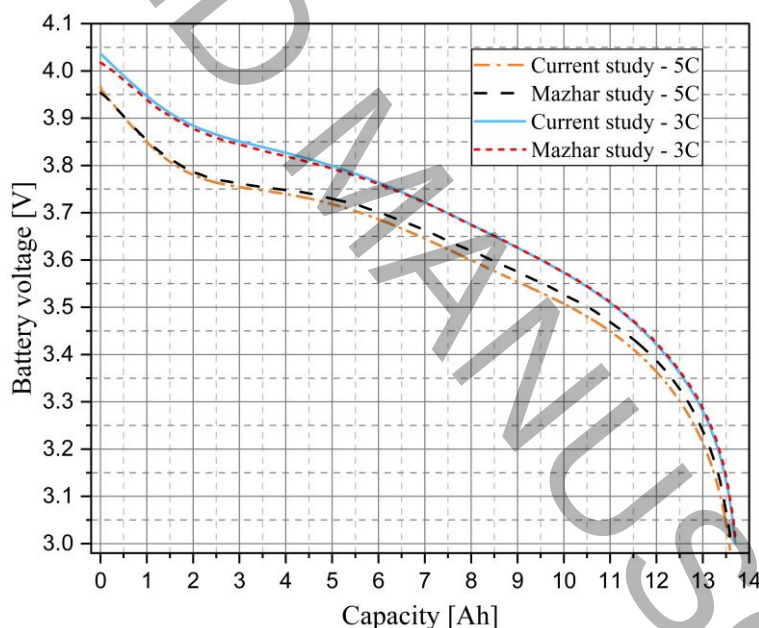
به منظور اطمینان از صحت روش عددی، مدل‌ها و دقت نتایج شبیه‌سازی، لازم است نتایج حاصل با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی معتبر مقایسه شوند. در پژوهش حاضر، صحت‌سنجی در سه بخش انجام می‌شود. بخش اول مربوط به اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی باتری لیتیوم-یون، بخش دوم مربوط به اعتبارسنجی فوم فلزی با نتایج تجربی و بخش سوم اعتبارسنجی میکروکانال جاذب حرارت حاوی نانوسیال Al_2O_3 با نتایج تجربی است.

با توجه به اینکه شبیه‌سازی دقیق عملکرد الکتریکی و حرارتی باتری نقش اساسی در نتایج استخراج شده در پژوهش فعلی دارد، صحت‌سنجی روش عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی باتری، با دو پژوهش عددی یو و همکاران [۲۷] و و مظهر و همکاران [۲۹] برای نرخ تخلیه شارژ ۳C، ۴C و ۵C انجام شده است. شکل ۵ نمودار حداکثر دمای باتری بر حسب زمان را برای نرخ‌های تخلیه شارژ ذکر شده نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که در اکثر زمان‌ها، مقادیر دما همپوشانی خوبی با نتیجه ارائه شده توسط یو و همکاران دارد. همچنین مطابق جدول ۶ مشاهده می‌شود که میانگین خطا کمتر از ۵٪ برای تمامی حالت‌ها است و بیشترین مقدار خطا کمتر از ۷٪ است که بیانگر صحت حل عددی ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد باتری، نمودار ولتاژ باتری بر حسب مقدار ظرفیت مصرفی باتری رسم شده و در شکل ۶ نمایش داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود نتایج پژوهش فعلی در بیشتر نقاط همخوانی قابل قبولی با پژوهش مظهر و همکاران دارد و مطابق جدول ۶ دارای حداکثر خطای کمتر از ۱٪ برای تمامی حالت‌ها است.



شکل ۵: مقایسه حداکثر دمای باتری بر حسب زمان در نرخ‌های تخلیه شارژ ۳C، ۴C و ۵C با نتایج پژوهش یو و همکاران [۲۷]

Figure 5. Comparison of the maximum battery temperature versus time at 3C, 4C, and 5C discharge rates with the results of Yu et al. [27]



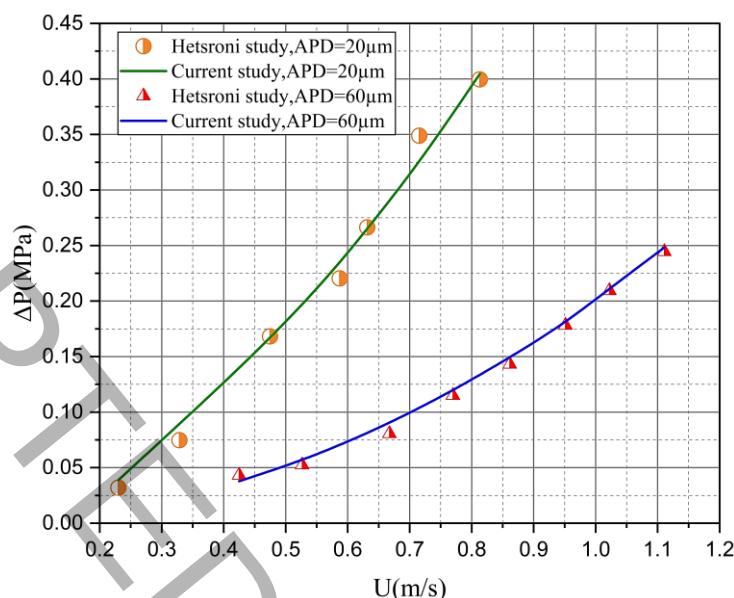
شکل ۶: مقایسه ولتاژ باتری بر حسب ظرفیت تخلیه‌شده در نرخ‌های تخلیه شارژ ۳C و ۵C با نتایج پژوهش مظهر و همکاران [۲۹]

Figure 6. Comparison of battery voltage versus discharged capacity at 3C and 5C discharge rates with the results of Mazhar et al. [29].

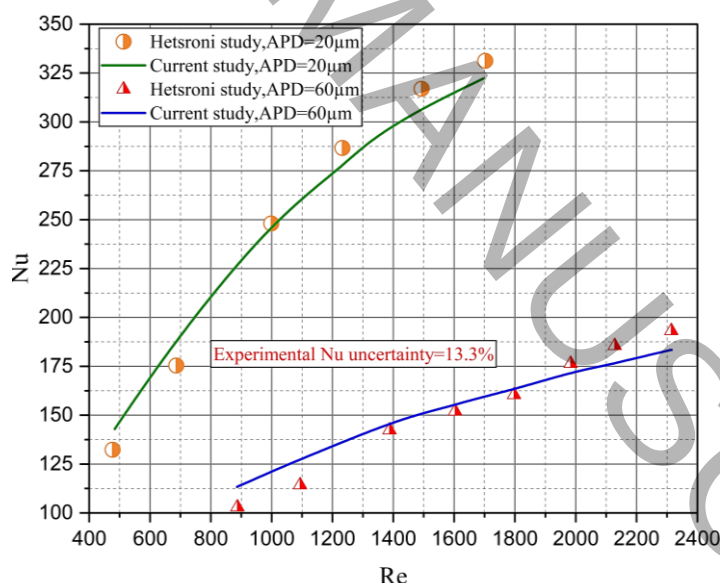
اعتبارسنجی حل عددی فوم فلزی شبیه‌سازی شده با مقایسه نتایج با پژوهش تجربی هتسرونی و همکاران^۱ [۳۹] به ازای دو نوع محیط متخلخل با تخلخل ۰/۳۲ و ۰/۴۴ که دارای قطر منافذ ۲۰ و ۶۰ میکرومتر هستند، انجام شده است. شکل ۷ نمودار افت فشار بر حسب سرعت ورودی سیال و شکل ۸، نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل مشاهده می‌شود که نتایج پژوهش فعلی در بیشتر حالت‌ها تطابق خوبی با پژوهش مرجع دارد. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، جدول ۶ میانگین و حداکثر

¹ Hetsroni et al

خطا حاصل از این صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، میانگین و حداکثر خطا برای افت فشار به ترتیب کمتر از ۸/۵٪ و ۱۱/۵٪ است. همچنین این مقادیر برای عدد ناسلت به ترتیب کمتر از ۵/۵٪ و ۱۲٪ هستند. با توجه به عدم قطعیت اندازه‌گیری ۱۳/۳٪ عدد ناسلت گزارش شده در پژوهش مرجع، خطاهای به‌دست‌آمده قابل قبول بوده و دقت مدل عددی حاضر تأیید می‌شود.



شکل ۷: مقایسه افت فشار بر حسب سرعت جریان برای میانگین قطر حفره ۲۰ و ۶۰ میکرومتر با نتایج پژوهش هتسرونی و همکاران [۳۹]
 Figure 7. Comparison of pressure drop versus flow velocity for mean pore diameters of 20 and 60 μ m with the results of Hetsroni et al. [39]

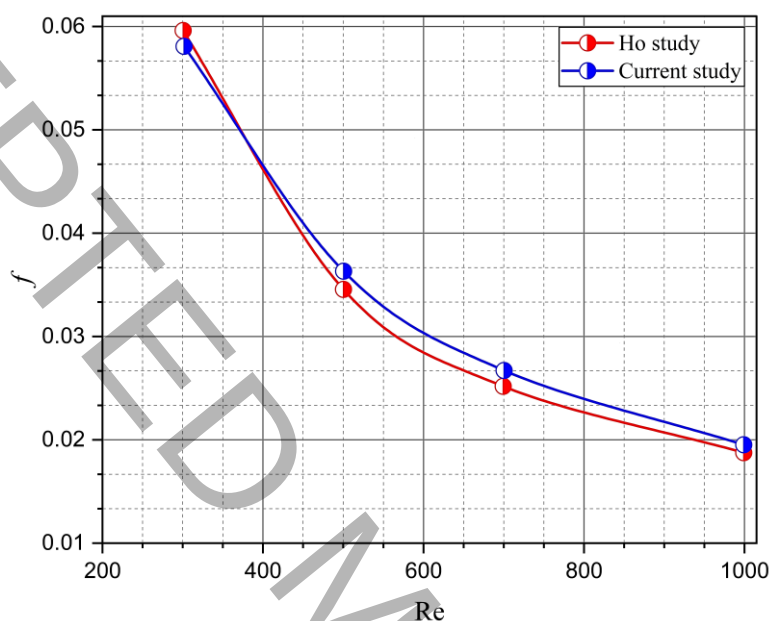


شکل ۸: مقایسه عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز به ازای دو میانگین قطر حفره ۲۰ و ۶۰ میکرومتر با پژوهش هتسرونی و همکاران [۳۹]
 Figure 8. Comparison of the Nusselt number versus the Reynolds number for mean pore diameters of 20 and 60 μ m with the results of Hetsroni et al. [39].

اعتبارسنجی حل عددی میکروکانال جاذب حرارت حاوی نانوسیال شبیه‌سازی شده با مقایسه نتایج با پژوهش تجربی هو و همکاران^۱ [۴۰] در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰-۱۰۰۰ انجام شده است. سیال خنک‌کاری مورد بررسی، نانوسیال آب- Al_2O_3 با کسر حجمی ۰/۰۲ انجام

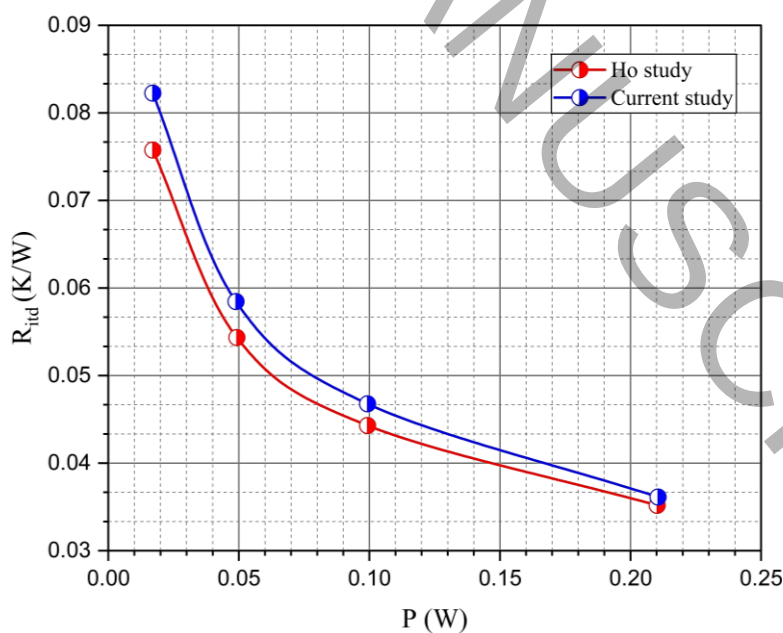
¹ Ho et al

شده است. به منظور صحت‌سنجی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی میکروکانال جاذب حرارت و نانوسیال، شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز و شکل ۱۰ نمودار مقاومت حرارتی بر حسب توان پمپاژ را نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل مشاهده می‌شود که در بیشتر حالت‌ها، نتایج پژوهش فعلی همپوشانی خوبی با نتایج ارائه شده توسط پژوهش مرجع دارد. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، جدول ۶ میانگین و حداکثر خطا حاصل از این صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۶، میانگین و حداکثر خطا برای ضریب اصطکاک به ترتیب کمتر از ۴/۵٪ و ۶/۵٪ است. همچنین این مقادیر برای مقاومت حرارتی به ترتیب کمتر از ۶/۵٪ و ۹٪ هستند که قابل قبول بوده و دقت مدل عددی حاضر تأیید می‌شود.



شکل ۹: مقایسه ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز با پژوهش هو و همکاران [۴۰]

Figure 9. Comparison of the friction factor versus the Reynolds number with the results of Hu et al. [40].



شکل ۱۰: مقایسه مقاومت حرارتی بر حسب توان پمپاژ با پژوهش هو و همکاران [۴۰]

Figure 10. Comparison of the thermal resistance versus the pumping power with the results of by Hu et al. [40].

جدول ۶: مقادیر میانگین و حداکثر خطای اعتبارسنجی حل عددی با پژوهش‌های مرجع

Table 6. Mean and maximum validation errors of the numerical results compared with reference studies.

بخش اعتبارسنجی	مرجع	نوع اعتبارسنجی	شرایط کاری	پارامتر مقایسه	میانگین خطای نسبی	حداکثر خطای نسبی
مدل‌سازی باتری به روش NTGK	یو[۲۷]	عددی	نرخ تخلیه شارژ ۳C	حداکثر دمای باتری (T_{max})	۲٪/۳۲	۴٪/۶٪
			نرخ تخلیه شارژ ۴C	حداکثر دمای باتری (T_{max})	۲٪/۵۵	۵٪/۱٪
			نرخ تخلیه شارژ ۵C	حداکثر دمای باتری (T_{max})	۴٪/۹۱	۶٪/۸٪
	مظهر[۲۹]	عددی	نرخ تخلیه شارژ ۳C	ولتاژ باتری (V)	۰٪/۱۵٪	۰٪/۶۶٪
			نرخ تخلیه شارژ ۵C	ولتاژ باتری (V)	۰٪/۴۳٪	۰٪/۹۷٪
	فوم فلزی هتسرونی[۳۹]	تجربی	میزان تخلخل ۰/۳۲	افت فشار (ΔP)	۸٪/۱	۱۱٪/۳۵
میزان تخلخل ۰/۶۴			افت فشار (ΔP)	۵٪/۸۵	۸٪/۸۷	
میزان تخلخل ۰/۳۲			عدد ناسلت (Nu)	۳٪/۶۸	۹٪/۷۶	
میزان تخلخل ۰/۶۴			عدد ناسلت (Nu)	۵٪/۱۷	۱۱٪/۸۶	
میکروکانال جاذب حرارت به همراه نانوسیال Al_2O_3	هو[۴۰]	تجربی	کسر حجمی نانوذره ۲٪	مقاومت حرارتی (R_{iid})	۶٪/۱۱	۸٪/۵۷
			کسر حجمی نانوذره ۲٪	ضریب استحکاک (f)	۴٪/۴۵	۶٪/۱

۳-۲ - عملکرد حرارتی باتری

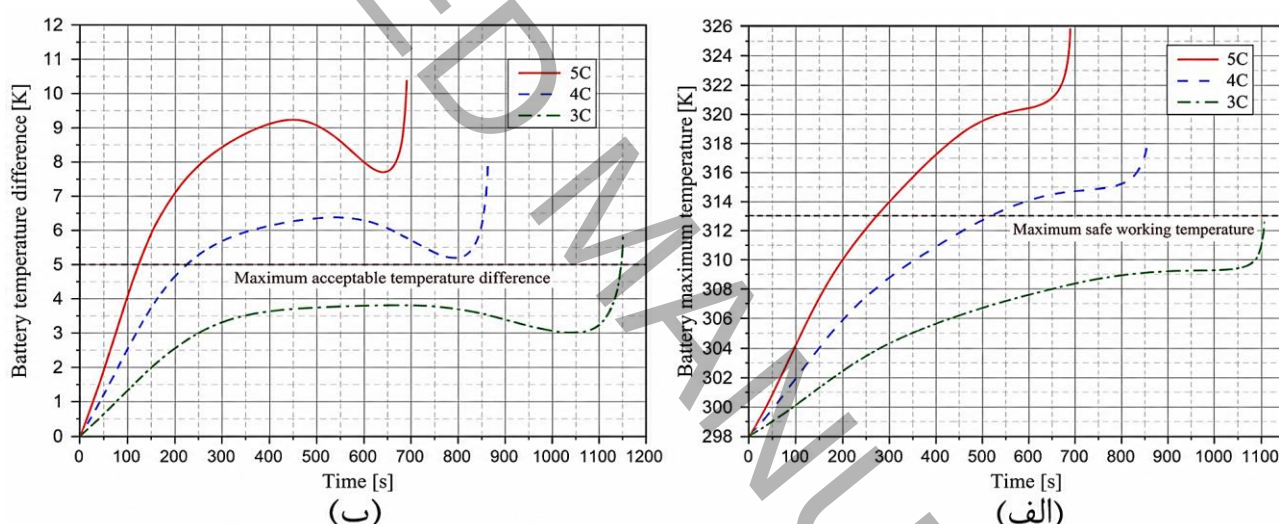
به منظور طراحی سیستم خنک‌کاری باتری، ابتدا باید عملکرد حرارتی باتری مورد بحث قرار بگیرد. به همین منظور در این بخش، حداکثر دمای باتری و بیشینه اختلاف دمای سلول و نحوه توزیع دما درون سلول باتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شرایط، تنها مکانیزم مؤثر انتقال حرارت بین باتری و محیط، جابجایی طبیعی از سطوح خارجی باتری است.

شکل ۱۱- الف نمودار حداکثر دمای باتری بر حسب زمان را به ازای نرخ‌های تخلیه شارژ ۳C، ۴C و ۵C نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که در ابتدای فرآیند دشارژ، دمای باتری به دلیل قطبی‌شدن گذرای الکتروشیمیایی^۱ و افت ولتاژ اهمی با نرخ بالایی افزایش پیدا می‌کند. با ادامه پیدا کردن فرآیند تخلیه شارژ، با تثبیت نسبی فرآیندهای الکتروشیمیایی و محدود بودن تغییرات نرخ تولید حرارت، نرخ افزایش دما کاهش پیدا می‌کند و در نرخ‌های تخلیه شارژ پایین‌تر، نرخ افزایش دما در بعضی زمان‌ها به صفر می‌رسد. در انتهای فرآیند تخلیه شارژ به دلیل کاهش غلظت یون لیتیوم در نزدیکی سطوح فعال و تشدید گرادیان‌های غلظتی و محدودیت‌های انتقال جرم، تولید حرارت افزایش یافته و دمای باتری با شیب بسیار زیاد افزایش پیدا می‌کند و باعث می‌شود که در نرخ‌های تخلیه شارژ بالاتر، حداکثر دمای باتری از محدوده مجاز عملکرد فراتر برود. شکل ۱۱-ب نمودار بیشینه اختلاف دمای باتری بر حسب زمان را به ازای نرخ‌های تخلیه شارژ ۳C، ۴C و ۵C نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که در ابتدا تخلیه شارژ به دلیل تولید حرارت بیشتر، گرادیان دمایی بالایی در باتری ایجاد می‌شود. در اواسط فرآیند تخلیه شارژ به دلیل محدود بودن تغییرات نرخ تولید حرارت، حرارت تولیدی در سطح باتری پخش شده و سبب کاهش گرادیان دمایی در داخل باتری می‌شود. در انتها فرآیند تخلیه شارژ به دلیل افزایش ناگهانی حرارت تولیدی، گرادیان دمایی بسیار شدیدی در باتری ایجاد می‌شود که سبب افزایش بیشینه اختلاف

¹ Electro-chemical transient polarization

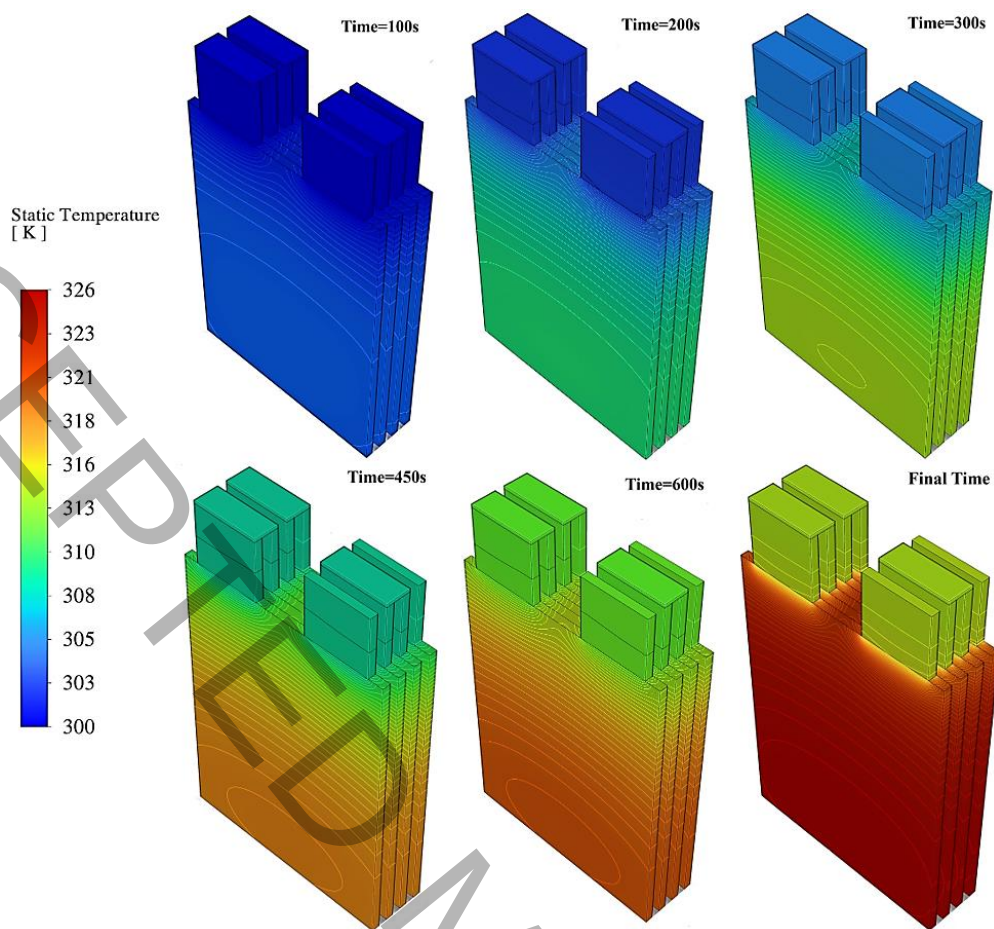
دمای باتری از محدوده مجاز می‌شود و این مورد در نرخ تخلیه شارژ بالاتر، بحرانی‌تر است. به منظور بررسی نحوه توزیع دما و یافتن نقاط داغ در سلول باتری، شکل ۱۲ کانتور توزیع دمای باتری را به ازای نرخ تخلیه شارژ ۵C در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل در ابتدای تخلیه شارژ (حدود ۱۰۰ ثانیه) توزیع دما نسبتاً یکنواخت است. علت این امر، پایین‌تر بودن میزان حرارت تولیدی و امکان دفع مؤثر گرما از طریق جابجایی طبیعی در سطوح خارجی باتری است. با گذشت زمان (۳۰۰ تا ۴۵۰ ثانیه) به دنبال افزایش گرمای تولیدی، گرادیان دمایی به تدریج شکل گرفته و نواحی با دمای بالاتر در داخل باتری ظاهر می‌شود. در حدود ۶۰۰ ثانیه، هم‌زمان با کاهش نسبی نرخ تولید حرارت، توزیع دما اندکی یکنواخت‌تر می‌شود. در انتهای فرآیند تخلیه شارژ، به دلیل افزایش ناگهانی و شدید نرخ تولید حرارت، دما با شیب زیادی افزایش یافته و گرادیان دمایی قابل توجهی درون باتری ایجاد می‌شود (به اختلاف دما بین نواحی نزدیک به زبانه‌ها و سایر نقاط توجه شود). این نتایج با روندهای مشاهده‌شده در شکل ۱۱ همخوانی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در تمامی زمان‌ها ناحیه داغ باتری در وسط باتری و نزدیک به پایین آن قرار دارد. علت این پدیده به این صورت است که زبانه‌ها دارای رسانندگی حرارتی بالایی هستند و در حرارتی تولیدی باتری دخالتی ندارند، پس به عنوان یک جاذب حرارت کوچک عمل کرده و باعث افزایش تبادل حرارت با محیط خارجی و کاهش دمای باتری در آن نواحی می‌شوند و سبب می‌شوند که نقاط داغ باتری در فاصله دور از زبانه‌ها و سطوح خارجی پدید بیایند.

با توجه به اینکه دمای بحرانی باتری در انتهای فرآیند تخلیه شارژ و به ازای نرخ تخلیه شارژ ۵C اتفاق می‌افتد، نتایج بخش‌های بعد در این شرایط مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱: تغییرات (الف) حداکثر دمای باتری (ب) بیشینه اختلاف دمای باتری با زمان به ازای نرخ‌های تخلیه شارژ ۳C، ۴C و ۵C

Figure 11. Variation of (a) the maximum battery temperature and (b) the maximum battery temperature difference with time at 3C, 4C, and 5C discharge rates.

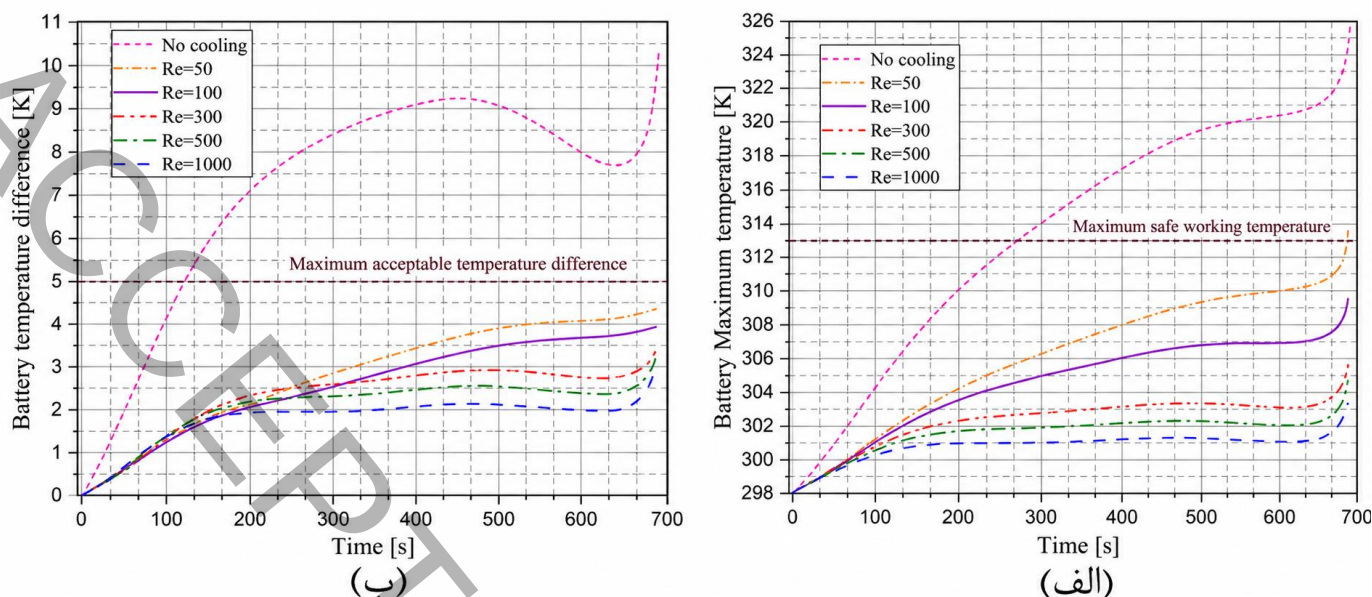


شکل ۱۲: کانتور توزیع دما در بسته باتری در زمان‌های مختلف به ازای نرخ تخلیه شارژ ΔC

Figure 12. Temperature distribution contours in the battery pack at different time instants for the 5C discharge rate.

۳-۳- عملکرد حرارتی باتری با سیستم خنک‌کاری مایع فاقد فوم فلزی

به منظور بررسی اثر سیستم خنک‌کاری فعال بر عملکرد حرارتی باتری، دبی ورودی سیال بر اساس عدد رینولدز در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ تغییر داده شده و اثر آن بر حداکثر دمای باتری و بیشینه اختلاف دمای درون سلول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در همین راستا، شکل ۱۳-الف نمودار حداکثر دمای باتری بر حسب زمان را برای اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزودن سیستم خنک‌کاری مایع، حتی در اعداد رینولدز پایین مانند عدد رینولدز ۱۰۰، حداکثر دمای باتری تا ۵۷٪ کاهش پیدا می‌کند و در محدوده دمایی مجاز عملکرد قرار می‌گیرد. به منظور بررسی میزان یکنواختی دمای درون باتری، شکل ۱۳-ب نمودار بیشینه اختلاف دمای سلول باتری بر حسب زمان را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزودن سیستم خنک‌کاری مایع و به دلیل توزیع مناسب میکروکانال‌ها در سطح جاذب حرارت، حتی در اعداد رینولدز پایین مانند عدد رینولدز ۱۰۰، بیشینه اختلاف دمای باتری تا ۶۱٪ کاهش پیدا می‌کند. با افزایش دبی جریان، یکنواختی دمای سلول بهبود می‌یابد؛ با این حال، این بهبود دارای محدودیت است. به گونه‌ای که با افزایش عدد رینولدز از ۵۰۰ به ۱۰۰۰، کاهش اختلاف دمای باتری کمتر از ۷٪ است. علت این رفتار را می‌توان با بررسی توزیع دمای سیال در طول میکروکانال توضیح داد. در ابتدای کانال، به دلیل اختلاف دمای بیشتر بین سیال خنک‌کننده و سطح باتری، نرخ انتقال حرارت بالاتر بوده و در نتیجه حداقل دمای موضعی سلول کاهش می‌یابد. اما با حرکت سیال در طول کانال و افزایش دمای آن، اختلاف دما کاهش یافته و توان انتقال حرارت در انتهای کانال تضعیف می‌شود. در نتیجه، حتی با افزایش بیشتر دبی سیال، اختلاف دمای سلول از یک مقدار حدی کمتر نمی‌شود و تنها بهبود جزئی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه دبی جریان متناظر با عدد رینولدز ۱۰۰، دمای باتری را در محدوده مجاز کاری تثبیت می‌کند، در ادامه پژوهش دبی جریان متناظر با این عدد رینولدز انتخاب می‌شود.

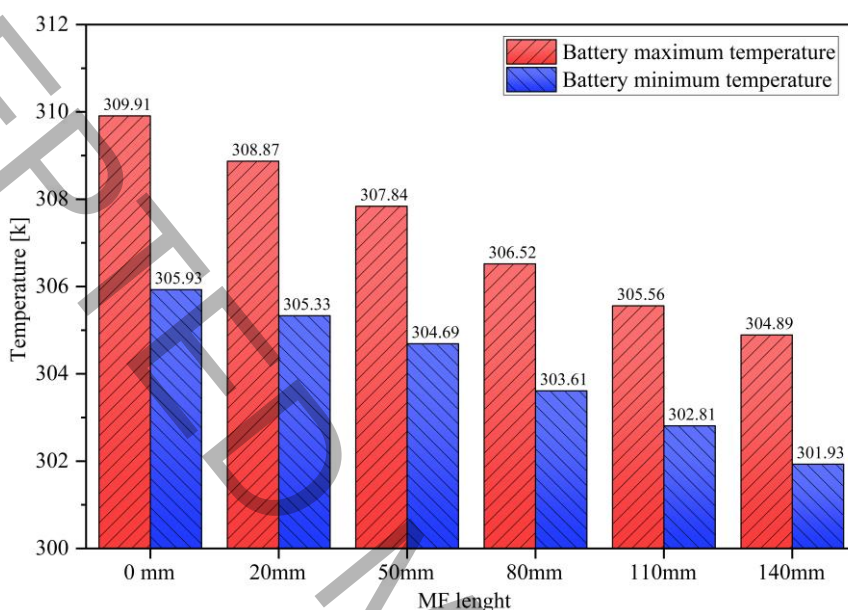


شکل ۱۳: نمودار الف) حداکثر دمای باتری ب) بیشینه اختلاف دمای باتری بر حسب زمان به ازای اعداد رینولدز ورودی مختلف
Figure 13. Variation of (a) the maximum battery temperature and (b) the maximum battery temperature difference with time for different inlet Reynolds numbers.

۴-۳- اثر طول فوم فلزی بر عملکرد حرارتی باتری

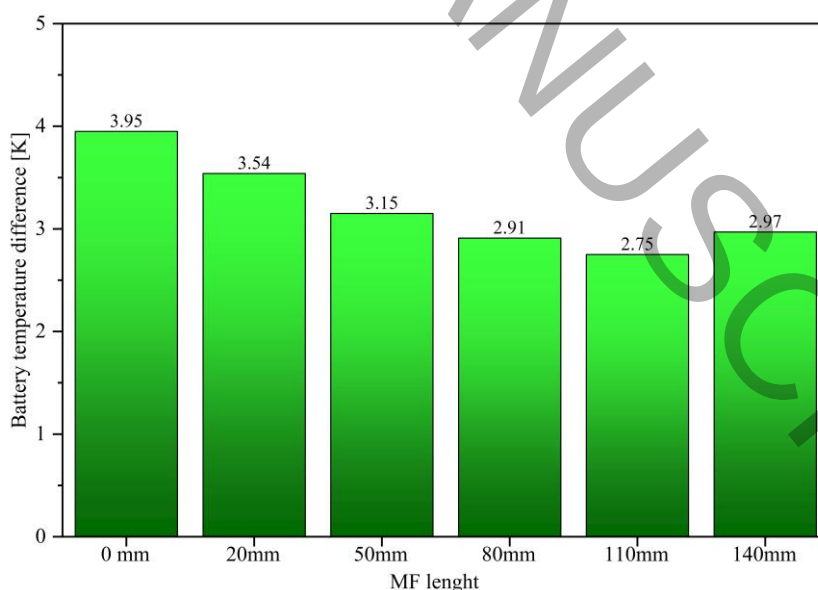
در این بخش، اثر طول فوم فلزی بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی سیستم مدیریت حرارتی باتری بررسی می‌شود. معیارهای ارزیابی شامل کاهش حداکثر دمای باتری، کاهش بیشینه اختلاف دمای باتری و محدود نگه داشتن افت فشار در بازه‌ای قابل قبول است. بدین منظور، فوم‌های فلزی در میکروکانال با طول‌های برابر و به ترتیب برابر با ۲۰، ۵۰، ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌متر در میکروکانال‌ها قرار داده شده‌اند. شکل ۱۴ تغییرات دمای بیشینه و کمینه باتری را برای طول‌های مختلف فوم فلزی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش طول فوم فلزی، هر دو مقدار دمای بیشینه و کمینه باتری کاهش می‌یابند. به گونه‌ای که استفاده از فوم فلزی با طول ۱۴۰ میلی‌متر، حداکثر دمای باتری در حدود ۴۲٪ (۵ کلوین) نسبت به حالت بدون فوم فلزی و مطابق شکل ۱۱ در حدود ۷۶٪ (۲۱ کلوین) نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کاری کاهش پیدا می‌کند. به منظور بررسی یکنواختی دمای باتری، شکل ۱۵ مقادیر بیشینه اختلاف دمای باتری را بر حسب طول فوم فلزی نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش طول فوم فلزی تا حدود ۱۱۰ میلی‌متر، اختلاف دمای باتری کاهش یافته و توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود. با این حال، افزایش بیشتر طول فوم فلزی موجب افزایش مجدد اختلاف دما و در نتیجه کاهش یکنواختی حرارتی باتری می‌شود. برای تبیین این رفتار، شکل ۱۶ و شکل ۱۷ به ترتیب کانتورهای سرعت و دما در مقطع میانی میکروکانال جاذب حرارت و شکل ۱۸ کانتور دمای باتری را برای دو حالت بدون فوم فلزی و حاوی فوم فلزی با طول ۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۶ و شکل ۱۷، در ابتدای میکروکانال، لایه‌های مرزی سرعت و دما در حال رشد بوده و پس از طی طول مشخصی به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسند. در حالت بدون فوم فلزی، این شرایط تا انتهای کانال حفظ می‌شود. در مقابل، با ورود سیال به ناحیه فوم فلزی، اختلاط جریان موجب برهم خوردن پروفیل سرعت شده و پس از خروج سیال از فوم، لایه‌های مرزی مجدداً تشکیل می‌شوند. این اختلاط جریان سیال و رشد مجدد لایه مرزی ضریب انتقال حرارت را افزایش داده و در کنار افزایش سطح تماس بین سیال و ساختار جامد فوم فلزی (به جمله آخر روابط (۲۶) و (۲۷) توجه شود)، موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. اثر این مکانیزم در شکل ۱۸ به خوبی قابل مشاهده است؛ به طوری که قرارگیری فوم فلزی موجب کاهش دمای باتری در تمامی نواحی شده و این کاهش در محل استقرار فوم فلزی محسوس‌تر است. با این حال، افزایش بیش از حد طول فوم فلزی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت در بخش ابتدایی میکروکانال می‌شود، که در نتیجه آن دمای میانگین سیال سریع‌تر افزایش می‌یابد (شکل ۱۷). افزایش بیشتر دمای سیال باعث می‌شود که در انتهای میکروکانال علارغم افزایش ضریب انتقال حرارت، به دلیل اختلاف دمای کمتر سیال و دیواره میکروکانال، نرخ انتقال حرارت

کاهش پیدا کند (نرخ انتقال حرارت تابعی از ضریب انتقال حرارت، سطح انتقال حرارت و اختلاف دما سیال و میکروکانال است) و حداکثر دمای باتری کاهش کمتری نسبت به حداقل دمای باتری داشته باشد که در نتیجه آن بیشینه اختلاف دمای باتری افزایش مجدد دارد و یکنواختی دمایی باتری کمتر می شود (شکل ۱۵). از سوی دیگر مطابق شکل ۱۹، افزایش طول فوم فلزی موجب افزایش قابل توجه افت فشار می شود؛ به طوری که با افزایش طول فوم از ۲۰ به ۱۴۰ میلی متر، افت فشار حدود هشت برابر افزایش می یابد، در حالی که بهبود عملکرد حرارتی تنها حدود ۳۷٪ است. از دیدگاه مهندسی، چنین افزایش شدیدی در افت فشار در مقایسه با میزان بهبود عملکرد حرارتی توجیه پذیر نیست. بنابراین، انتخاب طول بهینه فوم فلزی به منظور ایجاد تعادل بین عملکرد حرارتی و هزینه هیدرولیکی ضروری است.



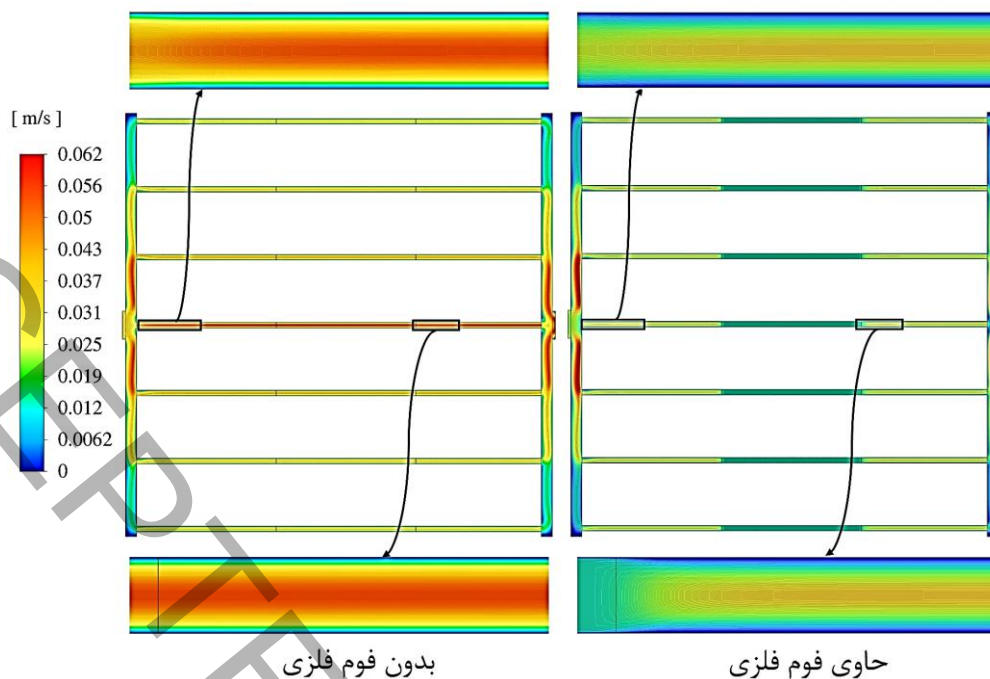
شکل ۱۴: مقادیر حداکثر و حداقل دمای باتری برای طول های مختلف فوم فلزی در پایان فرایند تخلیه شارژ برای عدد رینولدز ۱۰۰

Figure 14. Maximum and minimum battery temperatures for different metal foam lengths at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100.

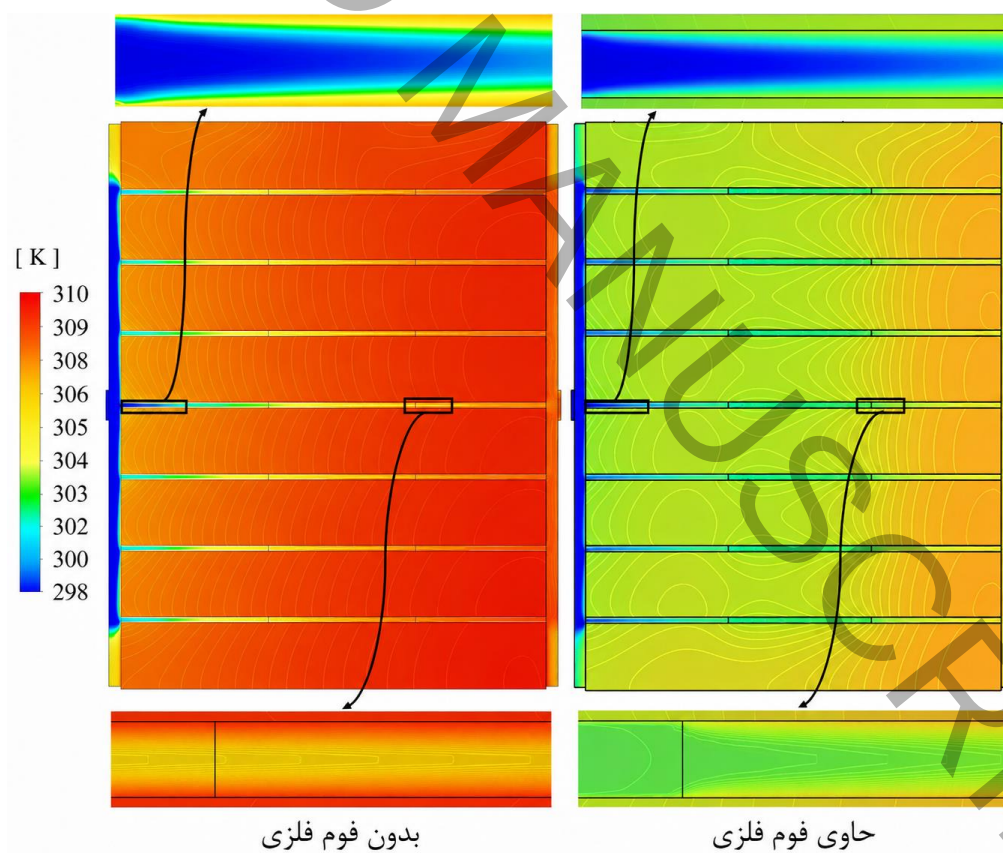


شکل ۱۵: مقادیر بیشینه اختلاف دمای باتری برای طول های مختلف فوم فلزی در پایان فرایند تخلیه شارژ برای عدد رینولدز ۱۰۰

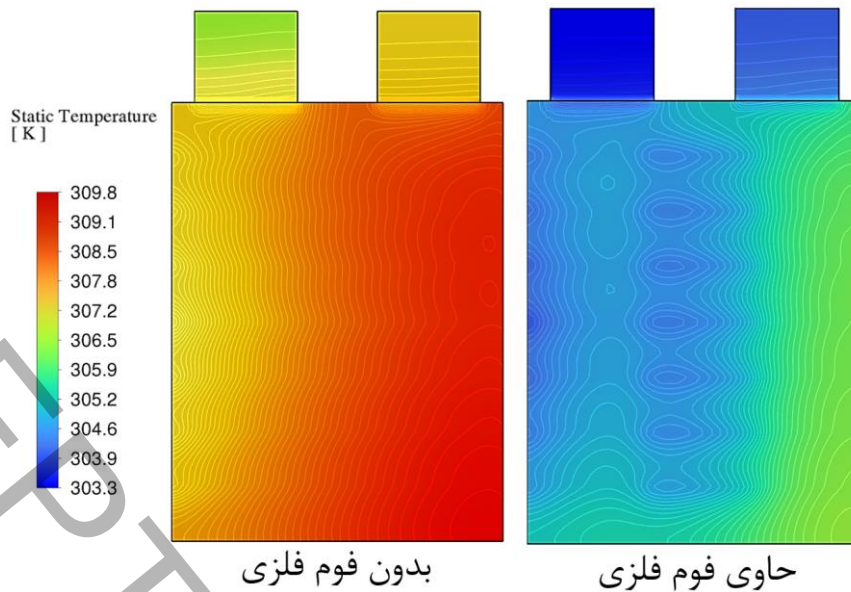
Figure 15. Maximum battery temperature difference for different metal foam lengths at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100.



شکل ۱۶: کانتور سرعت در صفحه میانی میکروکانال جاذب حرارت در پایان فرآیند تخلیه شارژ به ازای عدد رینولدز ۱۰۰
 Figure 16. Velocity contour on the mid-plane of the microchannel heat sink at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100.

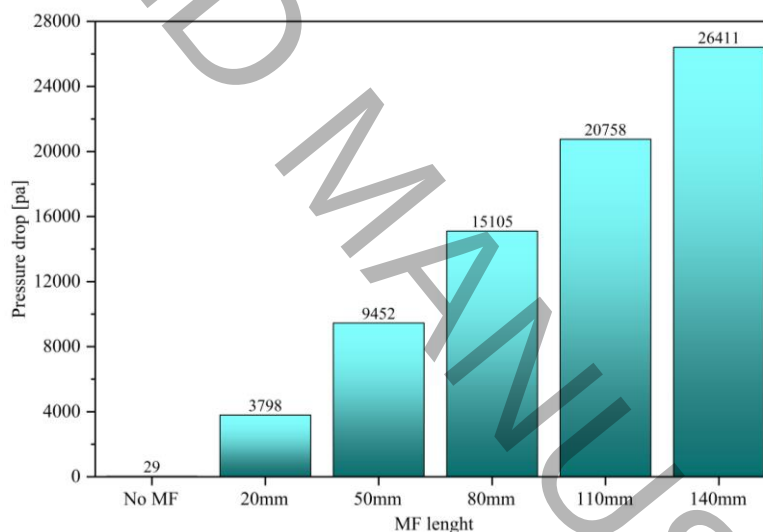


شکل ۱۷: کانتور دما در صفحه میانی میکروکانال جاذب حرارت در پایان فرآیند تخلیه شارژ به ازای عدد رینولدز ۱۰۰
 Figure 17. Temperature contour on the mid-plane of the microchannel heat sink at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100.



شکل ۱۸: کانتور دما در صفحه میانی سلول باتری در پایان فرآیند تخلیه شارژ به ازای عدد رینولدز ۱۰۰

Figure 18. Temperature contour on the mid-plane of the battery cell at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100



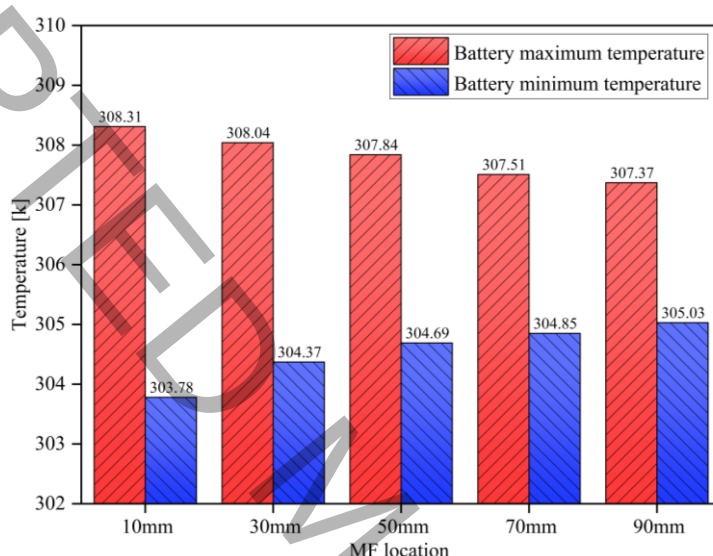
شکل ۱۹: مقادیر افت فشار سیال بر حسب طول فوم فلزی در پایان فرآیند تخلیه شارژ در عدد رینولدز ۱۰۰

Figure 19. Fluid pressure drop for different metal foam lengths at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100

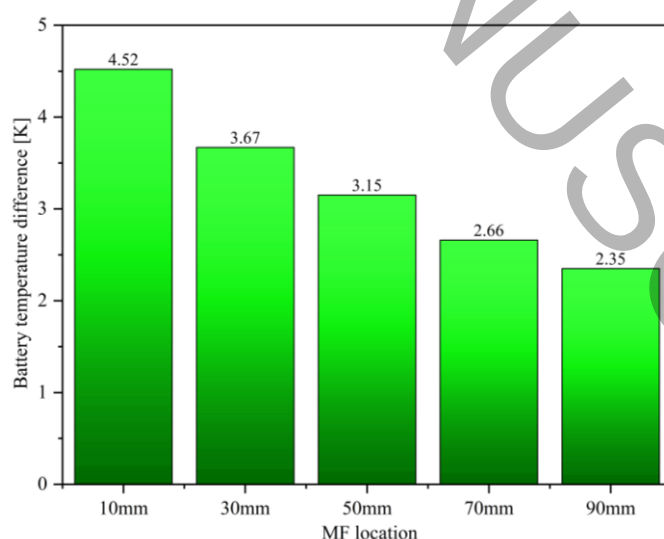
۵-۳- اثر محل قرارگیری فوم فلزی بر عملکرد حرارتی باتری

در این بخش، اثر محل قرارگیری فوم فلزی در میکروکانال بر شاخص‌های عملکردی معرفی شده در بخش قبل بررسی می‌شود. بدین منظور، فوم فلزی با طول ثابت ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و در فواصل ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متری از ورودی میکروکانال قرار داده شده است. شکل ۲۰ تغییرات دمای بیشینه و کمینه باتری را بر حسب محل قرارگیری فوم فلزی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش فاصله فوم فلزی از ورودی میکروکانال، دمای بیشینه باتری تا ۹/۲۵٪ (۰/۹۴ کلوین) کاهش یافته، در حالی که دمای کمینه باتری تا ۲۲٪ (۱/۲۵ کلوین) افزایش می‌یابد. این رفتار موجب بهبود یکنواختی دمای باتری می‌شود که در شکل ۲۱ نیز قابل مشاهده است. مطابق شکل ۲۱ با افزایش فاصله محل قرارگیری فوم فلزی از ۱۰ به ۹۰ میلی‌متر، بیشینه اختلاف دمای باتری تا ۴۸٪ (۲/۱۷)

کلوین) کاهش یافته و توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود. با بررسی شکل ۱۸ می‌توان علت این رفتار را تبیین کرد. مطابق این شکل بیشترین دمای باتری در نواحی نزدیک به انتهای میکروکانال رخ می‌دهد؛ از این رو، هرچه فوم فلزی به این ناحیه نزدیک‌تر باشد، انتقال حرارت در ناحیه داغ تقویت شده و در نتیجه حداکثر دمای باتری کاهش بیشتری می‌یابد. در مقابل، قرارگیری فوم فلزی در نزدیکی ورودی میکروکانال عمدتاً انتقال حرارت را در نواحی با دمای پایین‌تر افزایش می‌دهد و تأثیر کمتری بر ناحیه داغ انتهایی دارد؛ بنابراین، کاهش دمای بیشینه باتری محدودتر خواهد بود. از سوی دیگر، محل قرارگیری فوم فلزی تأثیر ناچیزی بر افت فشار جریان دارد و تغییرات ایجادشده در عملکرد هیدرولیکی سیستم بسیار محدود است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انتقال محل قرارگیری فوم فلزی به سمت انتهای میکروکانال، ضمن بهبود عملکرد حرارتی و افزایش یکنواختی دمای باتری، تأثیر محسوسی بر افت فشار نداشته و گزینه مناسب‌تری برای طراحی سیستم مدیریت حرارتی باتری محسوب می‌شود.



شکل ۲۰: مقادیر حداکثر و حداقل دمای باتری بر حسب محل قرارگیری فوم فلزی در پایان فرآیند تخلیه شارژ در عدد رینولدز ۱۰۰
Figure 20. Maximum and minimum battery temperatures for different metal foam locations at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100.

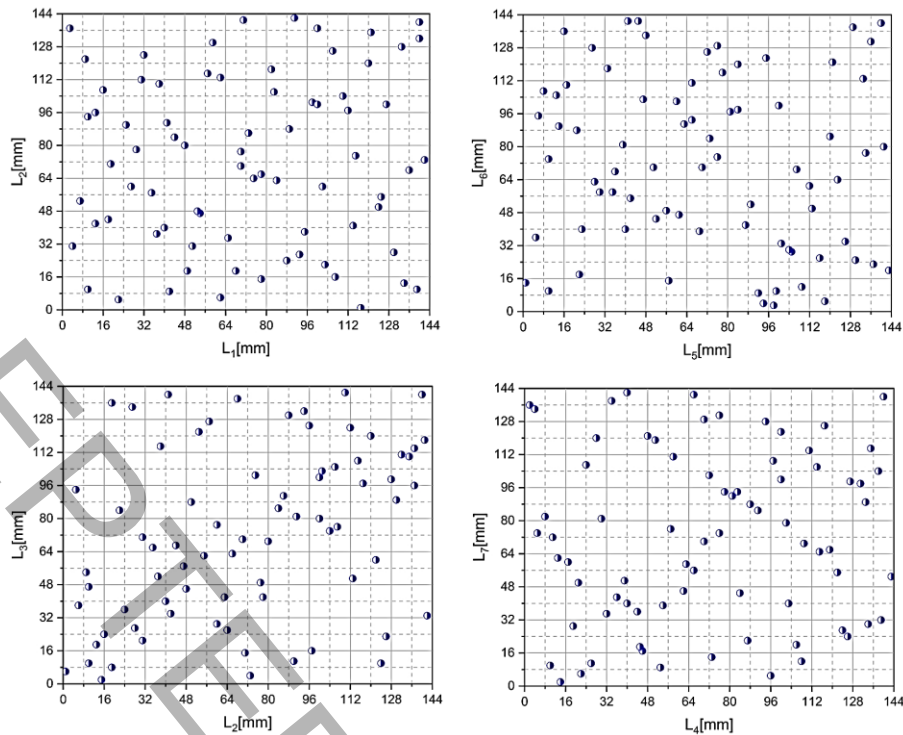


شکل ۲۱: مقادیر حداکثر اختلاف دمای باتری بر حسب محل قرارگیری فوم فلزی در پایان فرآیند تخلیه شارژ در عدد رینولدز ۱۰۰
Figure 21. Maximum battery temperature difference for different metal foam locations at the end of the discharge process for a Reynolds number of 100

در این بخش، فرآیند بهینه سازی با هدف بهبود هم زمان عملکرد حرارتی و هیدرولیکی سیستم خنک کاری، با اعمال کمترین تغییرات در ساختار هندسی کلی آن انجام می گیرد. بر این اساس، طول و موقعیت قرارگیری فوم فلزی در کانال ها به عنوان پارامترهای اولیه مسئله بهینه سازی تعیین می شوند. با توجه به نتایج بخش های پیشین، انتقال موقعیت فوم فلزی به سمت خروجی (انتهای) میکروکانال ها موجب کاهش دمای بیشینه باتری و بهبود یکنواختی توزیع دما می گردد، در حالی که تاثیر ناچیزی بر افت فشار جریان دارد. از این رو، موقعیت قرارگیری فوم فلزی در انتهای کانال ها ثابت فرض می شود. از سوی دیگر، از آنجا که افزایش طول فوم فلزی در عین بهبود خنک کاری و کاهش دمای بیشینه، سبب افزایش افت فشار سیال می شود، طول فوم به عنوان متغیر طراحی اصلی برگزیده شده است. همچنین به دلیل توزیع غیریکنواخت نرخ تولید حرارت در سطح باتری، برخلاف تحلیل های پیشین که طول فوم در تمامی میکروکانال ها یکسان در نظر گرفته شده بود، در این مرحله طول فوم در هر میکروکانال به صورت یک متغیر مستقل تعریف می گردد. این رویکرد نوین، امکان تطبیق موضعی ظرفیت انتقال حرارت فوم فلزی با نیاز حرارتی متغیر در هر ناحیه از باتری را فراهم می سازد. توابع هدف در این پژوهش شامل دمای بیشینه باتری، اختلاف دمای بیشینه باتری و افت فشار در نظر گرفته شده اند. جهت طراحی فضای نمونه برداری و تعیین نقاط محاسباتی، از روش طراحی ابرمکعب لاتین^۱ استفاده شده و تعداد ۷۰ روش طراحی ابرمکعب لاتین با ۷۰ نمونه اولیه استفاده شد. به منظور ارتقای یکنواختی توزیع نقاط و پوشش جامع فضای طراحی، معیار بهینه سازی حداقل فاصله به کار گرفته شد. در این رویکرد، با تولید ۱۰۰ فضای نمونه برداری مجزا و محاسبه فواصل اقلیدسی بین نقاط، فضایی که دارای بیشترین مقدار "کمترین فاصله بین دو نمونه" بود، به عنوان فضای نمونه برداری بهینه انتخاب گردید. در گام بعد، جهت استخراج پاسخ بهینه از میان داده های تولید شده، روش تاپسیس مبتنی بر وزن دهی آنتروپی مورد استفاده قرار گرفت. در این متدولوژی، وزن هر تابع هدف بر اساس محتوای اطلاعاتی داده ها و پراکندگی نتایج، به صورت خودکار تعیین می شود (شکل ۲۳) [۴۱]. در الگوریتم تاپسیس، نقطه ایده آل مثبت متناظر با کمترین مقدار توابع هدف (بهبود عملکرد) و نقطه ایده آل منفی متناظر با بیشترین مقادیر آن ها در نظر گرفته شد. در مسئله حاضر، اوزان توابع هدف شامل دمای بیشینه، اختلاف دما و افت فشار به ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۳۳ و ۰/۴۳ محاسبه گردیدند. مقادیر پارامترهای طراحی و نتایج مربوط به نمونه بهینه در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق با این نتایج، بهره گیری از طول های متغیر برای فوم فلزی در هر میکروکانال، علاوه بر ارتقای یکنواختی حرارتی، موجب بازتوزیع بهینه سرعت جریان شده است، به گونه ای که افت فشار کلی سیستم در مقایسه با حالت طول یکسان فوم، کاهش معناداری را نشان می دهد.

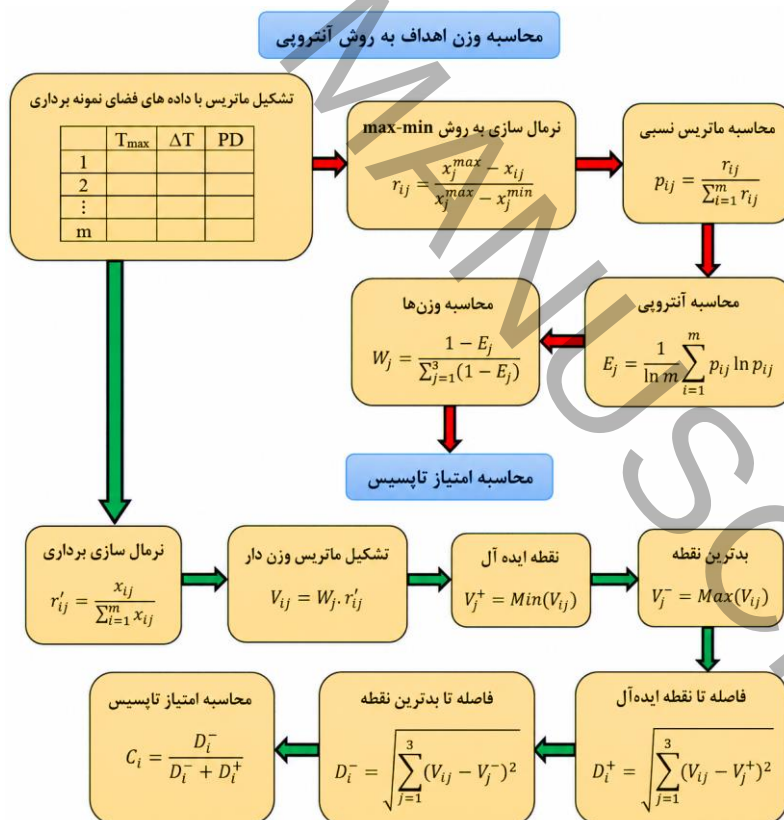
مقایسه نتایج نمونه بهینه این پژوهش با طرح بهینه گزارش شده توسط فو و همکاران [۲۶]، که از سیستم خنک کاری مبتنی بر میکروکانال های عمودی حاوی فوم فلزی استفاده کرده اند، نشان می دهد که عملکرد روش پیشنهادی حاضر بهبود قابل توجهی داشته است. در پژوهش فو و همکاران، حداکثر دمای باتری نسبت به حالت بدون سیستم خنک کاری حدود ۶۸/۳٪ کاهش یافته است، در حالی که در پژوهش حاضر این مقدار به ۷۰/۲٪ رسیده است (شکل ۱۱). همچنین، کاهش اختلاف دمای باتری در پژوهش مذکور برابر با ۳۷/۸۷٪ گزارش شده، در حالی که در پژوهش حاضر این مقدار به ۸۰/۵٪ رسیده است که بیانگر نقش مؤثر در نظر گرفتن طول مستقل فوم فلزی در هر میکروکانال در بهبود یکنواختی دمای باتری است. این بهبود عملکرد حرارتی در شرایطی حاصل شده است که افت فشار سیستم در مقایسه با پژوهش فو و همکاران، در شرایط کاری مشابه، حدود ۵۰ درصد کمتر است.

¹ Latin Hyper Cube



شکل ۲۲: نمایش بخشی از فضای نمونه برداری پارامترهای طراحی

Figure 22. Partial representation of the sampling space of the design parameters



شکل ۲۳: نمای شماتیک روند انتخاب نقطه بهینه با استفاده از روش تاپسیس و وزن دهی پارامترهای هدف به روش آنتروپی [۴۱]

Figure 23. Schematic representation of the optimal point selection process using the TOPSIS method and entropy-based weighting of the objective parameters [41].

جدول ۷: مقادیر پارامترهای طراحی و پارامترهای هدف در نقطه بهینه بدست آمده از روش تاپسیس

Table 7. Design and objective parameter values at the optimum point obtained using the TOPSIS method.

پارامترهای هدف			پارامترهای طراحی						
افت فشار سیال [pa]	بیشینه اختلاف دما باتری [K]	حداکثر دمای باتری [K]	L_v [mm]	L_e [mm]	L_d [mm]	L_f [mm]	L_r [mm]	L_r [mm]	L_1 [mm]
۴۴۹۲	۱/۹۷۵	۳۰۶/۴۴۵	۱۰۶	۱۰	۹۹	۱۱۴	۱۲۲	۵۳	۷

۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت کنترل دمای باتری‌های لیتیوم-یون در بهبود عملکرد، افزایش ایمنی و افزایش طول عمر آن‌ها، در این پژوهش یک سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر میکروکانال جاذب مورد بررسی قرار گرفت. سیستم مدیریت حرارتی مورد بررسی شامل چهار سلول باتری متصل به صورت سری و سه میکروکانال جاذب حرارت تعبیه شده بین سلول‌ها بود که وظیفه دفع حرارت تولیدی باتری را بر عهده داشتند. به منظور پیش‌بینی دقیق توزیع دما در سلول باتری، از مدل چندمقیاسی-چنددامنه‌ای همراه با زیرمدل الکتروشیمیایی نیومن-تیدمن-گو-کیم استفاده شد و عملکرد حرارتی باتری در نرخ تخلیه شارژ ۳C تا ۵C مورد بررسی قرار گرفت. سیال خنک‌کننده نانوسیال آب- Al_2O_3 با کسر حجمی ۲٪ بود که با استفاده از مدل تک فازی همگن شبیه‌سازی شد و عملکرد آن در محدوده عدد رینولدز ۵۰ - ۱۰۰۰ مورد ارزیابی گردید. همچنین، فوم فلزی آلومینیومی با تخلخل ۴۶٪ به کمک مدل دارسی - برینکمن - فورشه‌ایمر مدل‌سازی شد و داخل میکروکانال قرار گرفت. در ادامه اثرات طول و محل قرارگیری فوم فلزی بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی سیستم خنک‌کاری مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت، طول فوم فلزی با استفاده از روش تاپسیس و وزن‌دهی آنتروپی بهینه‌سازی شد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- با افزایش نرخ دشارژ از ۳C تا ۵C، حرارتی تولیدی باتری ۸۰٪ افزایش پیدا می‌کند و باعث عبور دمای باتری از محدوده مجاز کاری می‌شود.
- استفاده از میکروکانال جاذب حرارت حاوی نانوسیال Al_2O_3 با کسر حجمی ۲٪ و دبی متناظر با عدد رینولدز ۱۰۰، می‌تواند حداکثر دمای باتری را تا ۵۷٪ (۱۶ کلوین) و بیشینه اختلاف دمای باتری را تا ۶۱٪ (۵/۶ کلوین) کاهش دهد.
- استفاده از فوم فلزی به سبب افزایش سطح و ضریب انتقال حرارت سبب بهبود عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کاری می‌شود اما این بهبود عملکرد حرارتی توانمان با افزایش شدید افت فشار است.
- با افزایش طول فوم فلزی تا ۱۴۰ میلی‌متر، حداکثر دمای باتری تا ۴۲٪ نسبت به حالت بدون فوم فلزی و حدود ۷۶٪ نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کاری کاهش می‌یابد.
- با قراردادن فوم فلزی در نزدیکی انتهای میکروکانال، حداکثر دمای باتری ۲۵٪/۹ و بیشینه اختلاف دمای باتری تا ۴۸٪/۱۰ نسبت به حالتی که در ابتدا میکروکانال قرار بگیرد، کاهش پیدا می‌کند.
- نتایج بهینه‌سازی عددی نشان می‌دهد که با انتخاب طول فوم فلزی متفاوت در هر میکروکانال، مقدار بیشینه اختلاف دمای باتری ۱۸٪/۲۸ نسبت به کمترین مقدار حالت طول یکسان فوم فلزی کاهش پیدا می‌کند.
- در این پژوهش، هدایت حرارتی بخش فعال باتری به صورت همسانگرد و با مقدار یکسان در تمامی راستاهای اصلی در نظر گرفته شده است. این فرض ساده‌ساز می‌تواند بر پیش‌بینی توزیع دما و در نتیجه بر مقادیر پارامترهای هدف اثرگذار باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر ناهمسانگردی هدایت حرارتی بخش فعال باتری بر عملکرد حرارتی سیستم بررسی شده و میزان خطای ناشی از فرض همسانگرد بودن هدایت حرارتی نیز ارزیابی شود.

علائم انگلیسی

a_{sf}	چگالی سطح ویژه ی بین جامد - سیال، m^{-1}
C	نرخ شارژ یا تخلیه شارژ
C_F	ضریب اینرسی
C_P	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg.K$
d_h	قطر هیدرولیکی، m
d_p	قطر حفره، m
h_{sf}	ضریب انتقال حرارت موضعی جامد - سیال، $W/m^2.K$
j	چگالی جریان الکتروشیمیایی، A/m^2
K	نفوذ پذیری، m^{-2}
k	ضریب رسانندگی حرارتی، $W/m.K$
Nu	عدد ناسلت
n	بردار نرمال به سطح
P	فشار، Pa
Pr	عدد پرانتل
$\dot{Q}$	نرخ حرارت تولیدی، W/m^3
Q	ظرفیت باتری، Ah
Re	عدد رینولدز
T	دما، K
t	زمان، s
U	ولتاژ مدار باز باتری، V
V	ولتاژ لحظه ای باتری، V
$\vec{V}$	بردار سرعت، m/s
Vol	حجم سلول باتری، m^3

علائم یونانی

ε	میزان تخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $Pa.s$
ρ	چگالی، kg/m^3
σ	ضریب رسانندگی الکتریکی، S/m
$\varnothing$	پتانسیل الکتریکی در الکتروود، V

زیرنویس

amb	محیط خارجی
b	باتری
eff	موثر
$inlet$	ورودی
nf	نانوسیال
np	نانوذره
$nominal$	اسمی
p	حفره
s	جامد
0	حالت مرجع
$+$	الکتروود مثبت
$-$	الکتروود منفی

- [1] J. Tollefson, Earth is warmer than it's been in 125,000 years, says landmark climate report, *Nature: International Weekly Journal of Science*, (7871) (2021).
- [2] Z. Chen, Y. Qin, Z. Dong, J. Zheng, Y. Liu, Numerical study on the heat generation and thermal control of lithium-ion battery, *Applied Thermal Engineering*, 221 (2023) 119852.
- [3] M. Ding, X. Feng, Y. Peng, J. Tong, B. Hou, Y. Xing, W. Zhang, L. Wang, Y. Wu, J. Lv, Electrolyte induced synergistic construction of cathode electrolyte interphase and capture of reactive free radicals for safer high energy density lithium-ion battery, *Journal of Energy Chemistry*, 87 (2023) 207-214.
- [4] S. Shahid, M. Agelin-Chaab, A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries, *Energy Conversion and Management: X*, 16 (2022) 100310.
- [5] O.A. Alvarez, C.M. Da Silva, C.H. Amon, A 3D electrochemical-thermal coupled model for pouch-type lithium-ion batteries with counter-tab configuration, *Energy Advances*, (2026).
- [6] A. Greco, X. Jiang, D. Cao, An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite, *Journal of Power Sources*, 278 (2015) 50-68.
- [7] M. Mama, E. Solai, T. Capurso, A. Danlos, S. Khelladi, Comprehensive review of multi-scale Lithium-ion batteries modeling: From electro-chemical dynamics up to heat transfer in battery thermal management system, *Energy Conversion and Management*, 325 (2025) 119223.
- [8] R. Mehta, A. Gupta, Mathematical modelling of electrochemical, thermal and degradation processes in lithium-ion cells—A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192 (2024) 114264.
- [9] S. Rizvi, M.W. Tahir, N. Ramzan, C. Merten, Multiscale-multidomain model order reduction of Lithium-ion batteries for automobile application: A review, *Journal of Energy Storage*, 99 (2024) 113390.
- [10] A. Adeniran, S. Park, Optimized cooling and thermal analysis of lithium-ion pouch cell under fast charging cycles for electric vehicles, *Journal of Energy Storage*, 68 (2023) 107580.
- [11] H. Chun, H. Choi, Y. Jun, H. Lee, Comprehensive Study on Thermal Characteristics of Lithium-Ion Battery With Entropic Heat, *International Journal of Energy Research*, 2024(1) (2024) 8815580.
- [12] M. Abhishek, N. Napa, M.K. Agrawal, B. Tamma, A. Garg, Thermal modeling of large format prismatic lithium-ion cell—a comparative study, in: 11th SAEINDIA International Mobility Conference (SIIMC 2024), SAE Technical Paper, 2024.
- [13] B. Haridasan, P. Selvaraj, R.K. Velamati, A Physics-Informed Parameter Transfer Framework Between DFN and NTGK Models for Lithium-Ion Cells, *Energies*, 19(10) (2026) 2422.
- [14] O. Kalkan, A. Celen, K. Bakirci, Experimental and numerical investigation of the LiFePO₄ battery cooling by natural convection, *Journal of Energy Storage*, 40 (2021) 102796.
- [15] B. Heidarshenas, A. Aghaei, A.H. Zamani, Y. Yuan, Comparison of different cooling techniques for a lithium-ion battery at various discharge rates using electrochemical thermal modeling, *Applied Thermal Engineering*, 258 (2025) 124596.
- [16] S.S. Thakur, K. Dhuper, L. Kumar, Performance evaluation and optimization of water, CuO-water nanofluid, and nanoemulsion phase change coolants in liquid-cooled battery thermal management system, *Journal of Energy Storage*, 171 (2026) 122871.
- [17] S.S. Thakur, S.S. Chandel, A. Kakoria, S. Sinha-Ray, Enhancement in pool boiling heat transfer of ethanol and nanofluid on novel supersonic nanoblown nanofiber textured surface, *Experimental Heat Transfer*, 35(4) (2022) 516-532.
- [18] S. Wankhede, A. Kore, L. Kamble, P. Kale, Experimental investigation on an innovative serpentine channel-based nanofluid cooling technology for modular lithium-ion battery thermal management, *Heat Transfer*, 53(8) (2024) 4798-4821.

- [19] P. Soleymani, E. Saffarifard, J. Jahanpanah, M. Babaie, A. Nourian, R. Mohebbi, Z. Aakcha, Y. Ma, Enhancement of an air-cooled battery thermal management system using liquid cooling with CuO and Al₂O₃ nanofluids under steady-state and transient conditions, *Fluids*, 8(10) (2023) 261.
- [20] M. Misale, J.A. Bocanegra, A. Marchitto, Long-term experimental study on gravitational sedimentation of water aluminum oxide nanofluid at different volumetric concentrations, *International Journal of Sediment Research*, 38(3) (2023) 303-315.
- [21] A. Sarchami, M. Najafi, A. Imam, E. Houshfar, Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath, *International Journal of Thermal Sciences*, 171 (2022) 107244.
- [22] K. Qian, J. Sun, Y. Chen, Z. Nie, Simulation of the flow and heat transfer characteristics of open-cell metal foams: Two jet impingement heat sinks, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 115 (2025) 109890.
- [23] H. Choi, Y. Jun, H. Chun, H. Lee, Comprehensive feasibility study on metal foam use in single-phase immersion cooling for battery thermal management system, *Applied Energy*, 375 (2024) 124083.
- [24] M. Rabiei, A. Gharehghani, A.M. Andwari, Enhancement of battery thermal management system using a novel structure of hybrid liquid cold plate, *Applied Thermal Engineering*, 232 (2023) 121051.
- [25] Z. Fu, W. Zuo, Q. Li, K. Zhou, Y. Huang, Y. Li, Performance enhancement studies on the liquid cooling plate fully filled with porous medium for thermal management of lithium-ion battery pack, *Journal of Energy Storage*, 116 (2025) 116072.
- [26] Z. Fu, W. Zuo, Q. Li, K. Zhou, Y. Huang, Y. Li, Multi-objective optimization of liquid cooling plate partially filled with porous medium for thermal management of lithium-ion battery pack by RSM, NSGA-II and TOPSIS, *Energy*, 318 (2025) 134853.
- [27] Y. Xu, J. Shi, X. Nie, X. Liu, G. Liu, Design and thermal performance analysis of a novel dual-layer cascade phase change battery thermal management system, *Journal of Energy Storage*, 100 (2024) 113611.
- [28] C. Kök, A. Alkaya, Investigation of thermal behavior of lithium-ion batteries under different loads, *European Mechanical Science*, 4(3) (2020) 96-102.
- [29] M. Hussain, M.K. Khan, M. Pathak, Thermal analysis of phase change material encapsulated lithium battery pack using multi-scale multi-dimensional framework, *Journal of Energy Storage*, 65 (2023) 107290.
- [30] H. Gu, Mathematical analysis of a Zn/NiOOH cell, *Journal of the Electrochemical Society*, 130(7) (1983) 1459-1464.
- [31] D.A. Nield, A. Bejan, *Convection in porous media*, Springer, 2006.
- [32] N. Wakao, S. Kagei, *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*, Gordon and Breach Science Publishers, 1982.
- [33] A. Albojamal, K. Vafai, Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114 (2017) 225-237.
- [34] A. Sohankar, M. Gharehkhani, The effects of external magnetic fields on the flow and heat transfer in a three-dimensional microchannel, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 85(22) (2024) 3883-3907.
- [35] S. Aminossadati, A. Raisi, B. Ghasemi, Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46(10) (2011) 1373-1382.
- [36] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *Journal of chemical physics*, 20(4) (1952) 571-571.
- [37] H.E. Patel, K. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, in: *International Heat Transfer Conference 13*, Begel House Inc., 2006.

- [38] 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.
- [39] G. Hetsroni, M. Gurevich, R. Rozenblit, Sintered porous medium heat sink for cooling of high-power mini-devices, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27(2) (2006) 259-266.
- [40] C.-J. Ho, L. Wei, Z. Li, An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3) (2010) 96-103.
- [41] J.-H. Meng, Y. Liu, X.-H. Zhu, Z.-J. Yang, K. Zhang, G. Lu, Performance enhancement for exhaust thermoelectric power generation system by using porous pin fins based on a fully automatic optimization method, *Energy Conversion and Management*, 273 (2022) 116404.

Optimization of a Battery Thermal Management System Using a Microchannel Heat Sink Containing Metal Foam and Al₂O₃ Nanofluid

Amir Hossein Mosayyebi, Mohammad Gharehkhani, MohammadReza Hajmohammadi*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, the performance of a lithium-ion battery thermal management system incorporating a microchannel heat sink with a water–Al₂O₃ nanofluid (2% volume fraction) and metal foam was investigated at discharge rates of 3C–5C. The battery consists of four series-connected cells, each with a capacity of 14.6 Ah. The cooling system comprises seven microchannels with a 2×2 mm cross-section. The battery was modeled using the multi-scale multi-domain method coupled with the Newman–Tiedemann–GU–Kim submodel. The metal foam was modeled using the Darcy–Brinkman–Forchheimer equations. The effects of metal foam length and location on performance were investigated. The results showed that relocating the metal foam toward the end of the microchannels reduced the maximum battery temperature and temperature difference by up to 9% and 48% relative to placement near the inlet. Subsequently, the metal foam length in each microchannel was optimized using a multi-objective approach, and the design was selected using the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution method with entropy weighting. The optimized configuration reduced the maximum temperature and temperature difference by 70% and 80%, respectively, compared with the no-cooling case, and improved performance compared with the uniform foam-length configuration.

KEYWORDS

Lithium-ion battery, Microchannel heat sink, Metal foam, Al₂O₃ nanofluid, Cooling plate.