



## The Effect of Aluminum Porous Network Characteristics on the Complete Melting Time of Coconut Oil and the Temperature Uniformity of the Wall

Seyyed Ali Naghedifar<sup>1</sup>, Mohammad Moghiman<sup>2\*</sup>, Mojtaba Mamourian<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- 2 Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

In enclosures containing phase change materials (PCMs), walls subjected to a constant heat flux experience localized temperature rise. The objective of this study is to minimize the complete melting time while ensuring uniform temperature distribution on the heated wall, while maintaining the thermal capacity of the enclosure. In this study, an aluminum porous network occupies half of the enclosure containing coconut oil as the PCM. The effects of porous network placement, enclosure inclination angle relative to the horizontal, aspect ratio of the enclosure, and pore density of the porous structure on the complete melting time of the PCM, the maximum temperature deviation of the wall from the mean temperature, and the uniformity of the temperature distribution on the heated wall are numerically analyzed using ANSYS Fluent.

The results indicate that increasing the pore density from 5 to 20 pores per inch enhances temperature uniformity but increases the complete melting time by up to 12.6%. When the metallic network is positioned in the lower half of the enclosure, the shortest melting time of 2340 seconds is achieved. Increasing the aspect ratio from 2 to 1 and then to 0.5 improves temperature uniformity but has minimal impact on the complete melting time. The enclosure inclination angle has a significant influence on the complete melting time but a negligible effect on temperature uniformity. Specifically, at an inclination of -30 degrees, the melting time is 39% shorter than at +30 degrees. Finally, the optimal combination of these parameters is determined using the Taguchi method.

### Keywords

Semi-porous aluminum cavity  
Taguchi  
Temperature uniformity index  
Complete melting time  
Coconut oil .

Received: 01.09.2025

Revised: 03.09.2025

Accepted: 04.14.2025

\*Corresponding Author

Mohammad Moghiman

Email

[moghiman@um.ac.ir](mailto:moghiman@um.ac.ir)

## 1- Introduction

Phase change materials (PCMs) are widely used for thermal energy storage due to their ability to store and release large amounts of latent heat [1]. Despite their advantages, the main limitation of pure PCMs is their low thermal conductivity, which slows heat transfer and delays the phase transition process.

Research has shown that embedding PCM within metallic structures such as aluminum foams can significantly improve thermal performance. Atal et

al. [2] demonstrated that using paraffin saturated in aluminum foam inside a shell-and-tube TES unit reduced the melting and freezing cycle times, with lower foam porosity leading to faster phase transitions.

The geometry of the PCM container also plays a crucial role. Poran and Ahmad [3] numerically examined seven different configurations and concluded that a circular heat source substantially



increases the melting rate. Meanwhile, Hu et al. [4] studied 3D-printed thermal conductivity enhancers, including fins and porous structures, across 15 cooling system designs. Their results showed that porous structures outperformed traditional fins, achieving up to 3.5 times better cooling performance at 20 W. In a follow-up study, Hu et al. [5] further demonstrated that porous media-filled coolers provided up to 78.8% improvement at a 1.0 fill ratio under 10 W and 70°C conditions, with higher thermal input further enhancing performance.

The efficiency of TES units is highly dependent on both PCM conductivity and container design. Ghalambaz et al. [6] numerically modeled petal-shaped tubes enhanced with copper (Cu) and graphene oxide (GO) nanoparticles and found optimized designs that significantly improved heat transfer. A subsequent study by the same group [7] showed that adding copper porous networks into PCM systems reduced charging time, where the height and porosity of the metal network were the most influential factors, while nanoparticle concentration had a lesser effect.

Experimental investigations have also emphasized the advantages of PCM walls in TES units. Kurnia et al. [8] showed that using PCM as a wall material improved both insulation and energy storage capacity, compared to traditional TES units. Additionally, Kotb and Wang [9] analyzed the effect of nonlinear porosity distributions in copper foam, revealing that a positive porosity gradient reduced melting times by up to 22.67% and increased the energy storage rate by 38.32%.

## 2- The Problem Study

This study examines a phase change thermal storage unit containing coconut oil, partially embedded with an aluminum porous structure. While maintaining constant total thermal capacity, the research aims to reduce melting time and improve temperature uniformity along the heated wall. A numerical index is proposed to evaluate thermal uniformity. Key parameters—container tilt angle, pore density (PPI), aspect ratio, and porous material placement—are

analyzed. Using the Taguchi method, an optimal configuration is identified to maximize performance.

## 3- Research Methods

A numerical model is developed to study the melting behavior of a phase change material (PCM) embedded in a porous aluminum matrix under natural convection. The model assumes local thermal equilibrium, constant thermophysical properties, and neglects volume expansion. The enthalpy-porosity method is used to simulate the phase change, and the Darcy–Brinkman–Forchheimer model accounts for fluid flow in the porous medium. Permeability and inertia effects are estimated using empirical relations based on pore density and porosity. Effective thermal properties are calculated through volume averaging. This model provides a reliable framework for analyzing and optimizing heat transfer in PCM-metal foam systems.

## 4- Results

A two-dimensional square cavity (5 cm × 5 cm) was considered, with a uniform heat flux of 3000 W/m<sup>2</sup> applied on the left wall, representing a constant-flux thermal boundary similar to conditions encountered in thermal management systems for electronics. The baseline case employed a metal foam region with a porosity of 0.9 and a pore density of PPI = 10, located adjacent to the heated wall. The results indicated that the complete melting of the PCM occurred after 2780 seconds, with a maximum deviation of 1.31 °C between the wall's peak and average temperatures during the process. Initially, heat transfer was dominated by conduction, but as melting progressed, natural convection intensified, accelerating the melting rate. Toward the end, conduction again became dominant as the remaining solid PCM resided at the bottom of the cavity.

To assess the impact of foam placement, four configurations—foam located on the left (hot wall), top, right, and bottom—were evaluated. Temperature uniformity, quantified via a

Temperature Uniformity Index (TUI), was found to be most stable and closest to unity when the foam was placed adjacent to the hot wall, indicating a more even temperature distribution. However, this configuration did not significantly reduce the total melting time. In contrast, foam placed at the bottom minimized the melting duration due to a reduced PCM volume in that region, but resulted in higher peak wall temperatures and greater thermal gradients. These findings reveal a design trade-off between achieving uniform temperature distribution and minimizing the total melting time.

Further analysis explored the effect of varying the pore density (PPI) of the foam. Increasing PPI improved the TUI due to enhanced thermal conduction through the foam structure. However, higher PPI values also suppressed natural convection within the PCM, resulting in longer melting durations. Maximum temperature differences between the wall's peak and average temperatures decreased with increasing PPI, owing to the enhanced heat spreading ability of denser foam structures.

The influence of cavity geometry was investigated by altering the aspect ratio (AR) while maintaining constant cavity volume and total thermal input. An increase in AR led to a reduction in TUI and an increase in peak temperature differences, due to variations in boundary layer thickness along the extended vertical heated wall and associated changes in thermal resistance. Nonetheless, the total melting time remained relatively constant, highlighting the importance of wall geometry in temperature regulation rather than melting efficiency.

Finally, the effect of tilting the cavity with respect to the horizontal axis was studied for inclination angles of  $+30^\circ$ ,  $0^\circ$ , and  $-30^\circ$ . While the TUI remained largely unaffected by inclination due to minimal changes in thermal resistance or heat flux distribution, the total melting time was significantly influenced. A downward tilt of  $-30^\circ$  enhanced natural convection, reducing the full melting time by approximately 40% compared to the  $+30^\circ$  case.

This was attributed to earlier and stronger activation of buoyancy-driven flow within the cavity.

## 5- Conclusion

In this study, the influence of metal foam characteristics on the melting rate of a phase change material (PCM) and the temperature uniformity of the heated wall was numerically investigated. The key findings are summarized as follows:

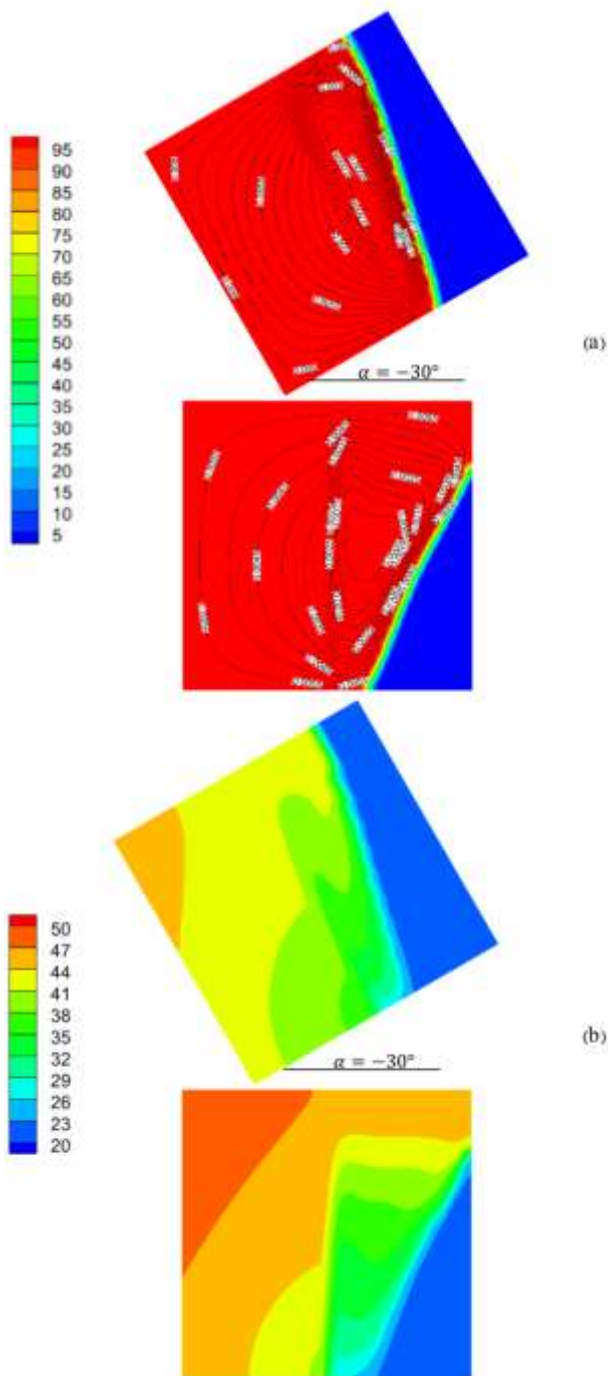
1 -Foam Position: Among the various locations of the porous medium within the cavity, placing the metal foam at the bottom results in the shortest melting time but yields the poorest temperature uniformity index (TUI). Conversely, positioning the foam at the top leads to the widest variation in both TUI and melting time.

2 -Pore Density (PPI): Increasing the foam's pore density (PPI) improves the temperature uniformity index, but also increases the total time required for complete PCM melting. Furthermore, a higher PPI reduces the maximum difference between the instantaneous peak and average wall temperatures.

3 -Aspect Ratio (AR): As the cavity's aspect ratio increases, TUI decreases, indicating reduced temperature uniformity. However, the melting time remains relatively unaffected. Additionally, higher aspect ratios lead to larger peak-to-average temperature differences on the heated wall.

4 -Inclination Angle: Varying the inclination angle of the cavity has minimal impact on temperature uniformity but significantly affects the total PCM melting time.

**Optimal Configuration:** Based on a Taguchi method optimization, the best configuration for minimizing both the total melting time and TUI occurs when the porous medium is placed adjacent to the heated (left) wall, the PPI is 5, the aspect ratio is 1, and the inclination angle is  $-30^\circ$ . In this optimal case, the total melting time is 2440 seconds, and the maximum temperature difference between the wall's instantaneous peak and average is  $1.56^\circ\text{C}$ .



**Figure 1:** (a) Contour of liquid phase volume fraction (%) and streamlines, (b) Temperature distribution (°C) for the optimized case and the baseline case at the time corresponding to the minimum TUI for each case (1660 seconds for the optimized case and 1980 se

## 6- References

[1] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available:

<https://books.google.com/books?id=N8LGwUNYWX8C>

[2] A. Atal, Y. Wang, M. Harsha, and S. Sengupta, "Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 9–16, 2016. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033)

[3] S. Poran and D. H. Ahmed, "Effect of cavity shape and heat source/sink orientation on PCM melting," *J. Therm. Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324219075>

[4] X. Hu, P. Chen, X. Guo, and X. Zhang, "Comparative studies on the thermal performance of novel PCM-based heat sinks using 3D-printed thermal conductivity enhancers," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 162, p. 108613, 2025. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613)

[5] X. Hu *et al.*, "Comparative studies on thermal management performance of PCM-based heat sinks filled with various height structured porous materials," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 263, p. 125376, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.125376](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125376)

[6] M. Ghalambaz *et al.*, "Melting process of the nano-enhanced phase change material (NePCM) in an optimized design of shell and tube thermal energy storage (TES): Taguchi optimization approach," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, p. 116945, 2021. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.116945](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116945)

[7] M. Ghalambaz *et al.*, "Phase-transition thermal charging of a channel-shape thermal energy storage unit: Taguchi optimization approach and copper foam inserts," *Molecules*, vol. 26, no. 5, p. 1235, 2021. doi: [10.3390/molecules26051235](https://doi.org/10.3390/molecules26051235)

[8] J. C. Kurnia *et al.*, "Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) wall insulator utilizing Taguchi method," *J. Energy Storage*, vol. 49, p. 104067, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104067](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104067)

[9] A. Kotb and S. Wang, "Enhanced thermal storage performance with non-linear porosity distribution in copper foam-PCM composites," *J. Energy Storage*, vol. 105, p. 114612, 2025. doi: [10.1016/j.est.2024.114612](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114612)



## تأثیر ویژگی‌های شبکه متخلخل آلومینیومی بر زمان ذوب کامل روغن نارگیل و یکنواختی دمای دیواره

سید علی ناقدی فرا<sup>۱</sup>، محمد مقیمان<sup>۲\*</sup>، مجتبی مأموریان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

کلمات کلیدی	چکیده
محفظه نیمه متخلخل آلومینیومی تاگوچی شاخص یکنواختی دما زمان ذوب کامل روغن نارگیل.	در محفظه‌های حاوی ماده تغییرافزدهنده، دیواره‌های با شار گرمایی ثابت، افزایش دمای موضعی را تجربه می‌کنند. هدف پژوهش حاضر این است که با ثابت نگه‌داشتن ظرفیت گرمایی محفظه، زمان ذوب کامل کمینه شده و توزیع دما در دیواره گرم، یکنواخت باشد. در این مطالعه، شبکه متخلخل آلومینیومی، نیمی از محفظه حاوی روغن نارگیل به عنوان ماده تغییرافزدهنده را پر کرده است. تأثیر مکان قرارگیری شبکه متخلخل، زاویه محفظه نسبت به افق، نسبت منظری محفظه، تراکم حفره‌های شبکه متخلخل، بر زمان ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده، اختلاف دمای حداکثر دیواره با دمای میانگین و یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم، به صورت عددی با نرم‌افزار ANSYS Fluent بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش تراکم حفره‌ها از ۵ تا ۲۰ حفره در اینچ، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده تا ۱۲/۶٪ افزایش می‌یابد. چنانچه مکان شبکه فلزی در نیمه پایینی محفظه باشد، کمترین زمان ذوب، معادل ۲۳۴۰ ثانیه را داراست. با افزایش نسبت منظری از ۲ به ۱ و سپس ۵/۰، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده تغییر چندانی نمی‌کند. تغییر زاویه محفظه نسبت به افق، تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل بسیار مؤثر بوده به طوری که زمان ذوب در زاویه ۳۰- درجه در مقایسه با ۳۰+ درجه، ۳۹٪ کمتر است. در نهایت، ترکیب بهینه این پارامترها، با روش تاگوچی تعیین شده است.
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵	
*نویسنده مسئول محمد مقیمان ایمیل <a href="mailto:moghiman@um.ac.ir">moghiman@um.ac.ir</a>	

### ۱- مقدمه

استفاده از مواد تغییرافزدهنده به صورت خالص محدودیت‌هایی دارد. یکی از این محدودیت‌ها، هدایت گرمایی پایین آن‌ها است که منجر به کند شدن فرآیند پخش گرما و تغییر فاز می‌شود. یکی از روش‌های جبران این کاستی، استفاده از محیط‌های متخلخل فلزی است. محیط متخلخل به عنوان پل گرمایی، انتقال گرما را بهبود می‌بخشد. در مقاله‌ای توسط آتال و همکاران [۴]، یک ذخیره‌ساز گرمایی پوسته-لوله مورد بررسی قرار گرفته است که پوسته آن شامل

ماده تغییرافزدهنده (PCM<sup>۱</sup>) ماده‌ای است که به‌منظور ذخیره انرژی گرمایی آن هم به صورت گرمای نهان، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. این مواد در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان قرار گرفته و در زمینه‌های بسیاری از جمله واحدهای ذخیره انرژی گرمایی (TES<sup>۲</sup>)، بازیابی گرمای اتلافی، سیستم‌های سرمایش و گرمایش، بهبود عملکرد یخچال، ایجاد شرایط آسایش دمایی در ساختمان‌ها و کشاورزی به کار رفته‌اند [۲،۳].

<sup>2</sup> Thermal energy storage

<sup>1</sup> Phase change material



داد که استفاده از محیط متخلخل باعث بهبود قابل توجه عملکرد حرارتی می‌شود. در توان ۱۰ وات و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، میزان بهبود نسبت پر شدگی ۱، ۰/۵ و ۰/۳ به ترتیب ۰/۵۴/۵، ۰/۷۸/۸ و ۰/۳۰/۳ بود. همچنین مشخص شد که افزایش توان گرمایی باعث بهبود بیشتر عملکرد خنک‌کننده‌ها می‌شود.

عملکرد گرمایی و نرخ ذوب در واحدهای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، به طراحی محفظه و رسانایی گرمایی ماده تغییرفازدهنده بستگی دارد. در پژوهشی توسط قلمباز و همکاران [۱۰]، عملکرد لوله‌های گلبرگی شکل در یک واحد TES پوسته و لوله به صورت عددی مدل‌سازی و تحلیل شده است. تأثیرات نانوذرات مس (Cu) و اکسید گرافن (GO) و همچنین هندسه لوله گلبرگی بر رفتار گرمایی بررسی شده است. آنان به کمک روش تاگوچی، طراحی بهینه لوله گلبرگی به همراه نانوذرات مس را مطالعه کرده و انتقال گرما را نسبت به لوله گرد بدون نانوذرات، بهبود داده‌اند. در پژوهشی دیگر توسط قلمباز و همکاران [۱۱] به کمک روش تاگوچی نشان داده شده است که افزودن شبکه متخلخل مسی به TES حاوی PCM با نانوذرات مس، زمان شارژ را کاهش می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که ارتفاع و تخلخل شبکه فلزی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هستند و درصد نانوذرات، اهمیت کمتری دارند.

در باتری‌های لیتیوم-یونی پرتوان، مدیریت گرمایی کارآمد برای ایمنی و جلوگیری از گسترش گرما ضروری است. مطالعه لیو و همکاران [۱۲] یک مدل عددی بر پایه روش حجم محدود برای شبیه‌سازی تولید و گسترش گرما، تغییر فاز و خنک‌سازی مایع ارائه می‌دهد. در این پژوهش، یک سیستم مدیریت گرمایی جدید با ساختاری چندلایه از مواد تغییرفازدهنده، همراه با لوله‌های خنک‌کننده حاوی فوم فلزی متخلخل طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم دما را زیر ۴۰/۶۷ درجه سانتی‌گراد نگه داشته و گسترش گرما را مهار می‌کند. افزایش ضخامت PCM با رسانایی بالا، کنترل دما را بهبود می‌دهد، اما پس از حدی مشخص، تأثیر آن کاهش می‌یابد.

در مطالعه کورنیا<sup>۲</sup> و همکاران [۱۳]، عملکرد یک واحد TES، با دیواره‌ای از PCM که به عنوان عایق گرمایی و ذخیره‌ساز انرژی عمل می‌کند، به صورت تجربی بررسی شده است. تأثیرات نسبت

مواد پارافینی اشباع شده در فوم آلومینیومی است. اثر تخلخل فوم‌های آلومینیومی بر رفتار گرمایی سیستم، به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که استفاده از ماتریس هادی به همراه PCM، به طور قابل توجهی زمان لازم برای یک چرخه ذوب-انجماد را کاهش می‌دهد و فوم فلزی با تخلخل کمتر به دلیل هدایت گرمایی موثر بالاتر، چرخه را کوتاه‌تر می‌کند. در پژوهشی توسط ایرانمش و همکاران [۵]، به بررسی تأثیر جهت و اندازه فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد یک مبدل گرمایی سه لوله‌ای قائم در حضور محیط متخلخل پرداخته شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد میزان انرژی ذخیره شده در ماده تغییرفازدهنده در بستر محیط متخلخل نسبت به ماده تغییرفازدهنده خالص تا ۱۶۶ درصد افزایش یافته است. در مطالعه بهرامی و صابری [۶]، یک استوانه تو در تو با فضای پر شده از ماده تغییرفازدهنده بررسی شده و تأثیر طول، ضخامت، جنس و نوع پره‌های متخلخل بر انتقال گرما، توسط آن‌ها ارزیابی گردیده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پره‌های متخلخل بهبود قابل توجهی در توزیع گرما ایجاد می‌کنند، به طوری که هندسه با پنج پره متخلخل، زمان ذوب را به یک‌سوم کاهش داده است.

یکی از عوامل مؤثر و تعیین‌کننده در فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده، شکل محفظه حاوی این ماده است. پوران و احمد [۷] اثر نوع شکل محفظه و راستای چشمه/چاه گرمایی را بر نرخ فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده بررسی کرده‌اند. آن‌ها در مجموع ۷ نوع چیدمان مختلف را با ثابت نگه‌داشتن طول چشمه/چاه گرمایی و مساحت محفظه، شبیه‌سازی عددی کرده و نتیجه گرفتند که منبع گرمایی دایره‌ای شکل، تأثیر بسزایی در افزایش نرخ ذوب دارد. در پژوهشی هو<sup>۱</sup> و همکاران [۸]، به مطالعه دو نوع افزایش رسانایی گرمایی چاپ‌شده با پرینتر سه‌بعدی، شامل فین‌ها و مواد متخلخل ساختاریافته پرداخته‌اند. ۱۵ نمونه خنک‌کننده با پیکربندی‌های مختلف طراحی و تحت بررسی تجربی و عددی در توان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ وات ارزیابی شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که خنک‌کننده‌های متخلخل عملکرد بهتری نسبت به فین‌ها دارند و در توان ۲۰ وات بیشترین بهبود تا ۵/۳ برابر مشاهده شده است. در پژوهشی دیگر هو و همکاران [۹]، از مواد متخلخل ساختاریافته به عنوان افزایش رسانایی حرارتی در PCM استفاده کرده‌اند. این خنک‌کننده‌ها، با پرینتر سه‌بعدی ساخته و با نسبت‌های مختلف (۰، ۰/۳، ۰/۵ و ۱) پر شده و تحت توان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ وات بررسی گردیده‌اند. نتایج آن‌ها نشان

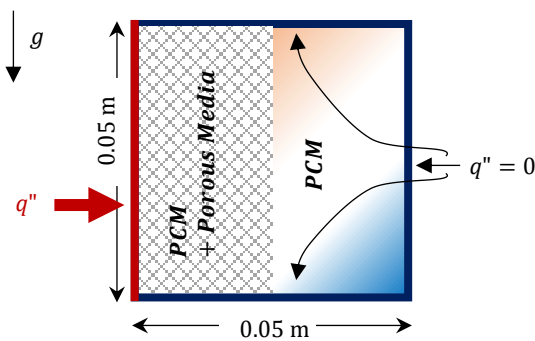
<sup>2</sup> Kurnia<sup>1</sup> Hu

حجم PCM به سیال انتقال گرما (HTF<sup>1</sup>)، دمای ورودی و دبی حجمی HTF به کمک روش تاگوچی، ارزیابی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد دیواره حاوی PCM عایق گرمایی بهتری ایجاد کرده و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را نسبت به TES سنتی، افزایش می‌دهد. پژوهش کتب و وانگ [۱۴] تأثیر توزیع تخلخل غیرخطی شبکه فلزی مس بر ذوب و عملکرد گرمایی اسید پالمیتیک را بررسی می‌کند. نتایج آن دو نشان می‌دهد که توزیع تخلخل مثبت در جهت x زمان ذوب را ۱۰/۴٪ و در جهت y آن را ۱۶/۷۴٪ کاهش می‌دهد. بهینه‌سازی دوبعدی توزیع تخلخل، زمان ذوب را ۲۲/۶۷٪ کاهش داده و نرخ ذخیره انرژی را ۲۸/۳۲٪ افزایش می‌دهد.

در پژوهش حاضر، محفظه حاوی روغن نارگیل، که نیمی از آن دارای شبکه متخلخل آلومینیومی است، مطالعه گردیده است. در این مطالعه ظرفیت گرمایی کل محفظه ثابت نگه داشته شده است و هدف، کاهش زمان ذوب و در عین حال، افزایش یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم شار ثابت است. در این راستا، شاخصی عددی جهت شناسایی یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم، معرفی گردیده و تأثیرات زاویه محفظه نسبت به افق، تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI<sup>3</sup>)، نسبت منظری محفظه و محل قرارگیری محیط متخلخل در محفظه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در آخر به کمک روش تاگوچی، ترکیب بهینه این پارامترها تعیین شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی روغن نارگیل و آلومینیوم [۱۵]

خواصیت (واحد)	روغن نارگیل		آلومینیوم
	فاز جامد	فاز مایع	
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۹۲۰	۹۱۴	۲۹۷۰
$\mu$ (Pa.s)	۰/۰۳۲۶	-	-
$C_p$ ( $\frac{J}{kg.K}$ )	۳۷۵۰	۲۰۱۰	۷۶۵
$\beta$ (1/K)	$9/3779 \times 10^{-4}$	-	-
$k$ ( $\frac{W}{m.K}$ )	۰/۲۲۸	۰/۱۶۶	۴۰
$L_f$ (J/kg)	۱۰۳۰۰۰	-	-
$T_{std}$ (°C)	۲۳	-	-
$T_{liq}$ (°C)	۲۵	-	-



شکل ۱: هندسه مسئله برای حالت پایه

شکل ۱، هندسه مسئله را نمایش می‌دهد. در این پژوهش، محفظه از ماده تغییرفازدهنده پُر شده و نیمی از آن دارای شبکه آلومینیومی متخلخل با تخلخل  $\phi = 90\%$  است. دیواره سمت چپ شار ثابت بوده و بقیه دیواره‌ها عایق گرمایی‌اند. محفظه با نسبت منظری یک (مربع)، به عنوان حالت پایه<sup>۴</sup>، دارای ابعاد  $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$  و شار دیواره گرم برابر  $3000\text{ W/m}^2$  است. با تغییر ابعاد محفظه، شار گرمایی به گونه‌ای اعمال شده است که نرخ گرمای ورودی، یکسان باشد. همچنین، به منظور یکسان بودن مقدار ماده تغییرفازدهنده در تمامی موارد، حجم محفظه‌ها با ابعاد گوناگون، برابر حجم مورد پایه، یعنی  $0.0025\text{ m}^3$  در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای محفظه‌هایی با نسبت منظری (نسبت ارتفاع به طول محفظه) برابر نیم و ۲، شار گرمایی دیواره گرم، به ترتیب  $3000 \times \sqrt{2}\text{ W/m}^2$  و

## ۲- توصیف مسئله

۱ Heat transfer fluid  
۲ Pore per inch

<sup>3</sup> Pore per inch

<sup>4</sup> Base case

## ۳- مدل عددی و معادلات حاکم

مدل عددی با در نظر گرفتن همرفت طبیعی برای توصیف فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در شبکه متخلخل آلومینیومی، ارائه شده است. این مدل، با استفاده از فرضیات زیر توسعه یافته است:

۱- خواص ترموفیزیکی PCM و شبکه متخلخل آلومینیومی در هر فاز ثابت فرض می‌شوند.

۲- انبساط حجمی PCM در طول فرآیند تغییر فاز نادیده گرفته می‌شود.

۳- PCM و شبکه متخلخل آلومینیومی در تعادل گرمایی محلی فرض شده‌اند [۱۶].

۴- شبکه فلزی متخلخل، به صورت ایزوتروپیک، ساختاریافته و همگن فرض می‌شود.

۵- PCM مایع به صورت آرام، ناپایا، نیوتنی، ایزوتروپیک و غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده و از تقریب بوزینسک برای

جمله شناوری، پیروی می‌کند؛

۶- اثر اتلاف ویسکوزیته و تابش گرمایی نادیده گرفته می‌شود.

۷- تکنیک آنتالپی-تخلخل برای شبیه‌سازی فرآیند ذوب استفاده شده است [۱۷].

با توجه به فرضیات مذکور، معادلات پیوستگی، مومنتم، و انرژی برای شبکه متخلخل فلزی پر شده با PCM، به صورت زیر ارائه می‌شوند [۱۶، ۱۸، ۱۹]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم

مدل‌های گوناگونی برای معادله مومنتوم در محیط تخلخل ارائه شده است. در مطالعه حاضر، مدل توسعه یافته داریسی - برینکمن - فورچهمر [۲۰] که به طور کامل اثرات اینرسی را در نظر می‌گیرد، اتخاذ شده است. بنابراین، معادلات مومنتوم در امتداد محورهای  $x$  و  $y$  به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{1}{\phi^2} \left[ U \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + V \frac{\partial(\rho U)}{\partial y} \right] \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + S_x + S'_x \\ + \rho g \beta (T - T_f) \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{1}{\phi^2} \left[ U \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} + V \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} \right] \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + S_y + S'_y \\ + \rho g \beta (T - T_f) \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $S$  و  $S'$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_x = \frac{(1 - \xi)^2}{\xi^3 + \delta} A_{msh} U, S_y = \frac{(1 - \xi)^2}{\xi^3 + \delta} A_{msh} V \quad (4)$$

$$S'_x = \left( \frac{\mu}{\kappa} + \frac{\rho \epsilon |U|}{\sqrt{\kappa}} \right) U, S'_y = \left( \frac{\mu}{\kappa} + \frac{\rho \epsilon |U|}{\sqrt{\kappa}} \right) V \quad (5)$$

جملات چشمه در معادله (۴) مربوط به منطقه نیمه جامد است، جایی که PCM تغییر فاز را تجربه می‌کند.  $\delta$  مقداری بسیار کوچک، برابر  $10^{-3}$  در نظر گرفته می‌شود تا از هرگونه تقسیم بر صفر جلوگیری شود.  $A_{msh}$  نمایانگر ثابت منطقه نیمه جامد است

و  $\xi$  کسر حجمی فاز مایع را نشان می‌دهد. مقدار  $A_{msh}$  برابر با  $10^8$  و ثابت فرض می‌شود تا تطابق خوبی میان نتایج محاسباتی و تجربی برای انتقال گرما ماده تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل حاصل شود [۱۶]. عبارات چشمه در معادله (۵)، اثرات داریسی و برینکمن - فورچهمر را نشان می‌دهند، که در آن  $\epsilon$ ، ضریب اینرسی و  $\kappa$ ، نفوذپذیری<sup>۱</sup> محیط متخلخل است.

معادله‌ای که کسر حجمی فاز مایع را به دما مرتبط می‌کند برای حل معادله انرژی استفاده می‌شود و به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۱]:

$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{اگر } T < T_{std} \\ \frac{T - T_{std}}{T_{liq} - T_{std}} & \text{اگر } T_{std} \leq T \leq T_{liq} \\ 1 & \text{اگر } T > T_{liq} \end{cases} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Permeability

فلزی پُر شده با PCM، پارامترهای حیاتی برای مدل‌سازی دقیق انتقال گرما و تغییر فاز در این مواد هستند. روابط تحلیلی و تجربی متعددی بر اساس ساختار شبکه‌های فلزی توسعه یافته‌اند. برخی مقالات پژوهشی خلاصه‌ای از روابط موجود برای رسانایی گرمایی مؤثر را ارائه داده‌اند [۲۴، ۱۹]. در مطالعه حاضر، مدلی برای پارامترهای مؤثر انتخاب شده است که تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی و داده‌های تجربی ارائه شده در مرجع [۱۵] حاصل می‌کند. روابط مربوط به رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$(\rho C_p)_{eff} = \phi(\rho C_p)_{PCM} + (1 - \phi)(\rho C_p)_{Mtlf} \quad (11)$$

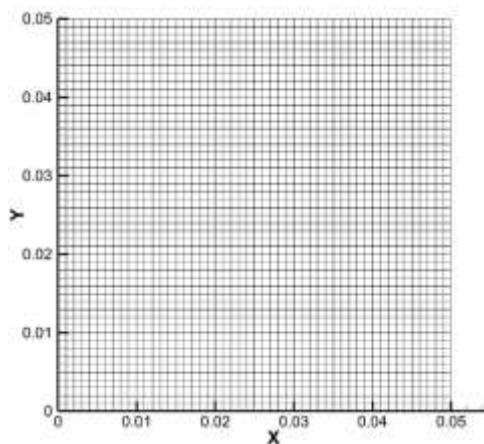
$$k_{eff} = \phi k_{PCM} + (1 - \phi)k_{Mtlf} \quad (12)$$

که در آن  $0 < \phi < 1$  است.

#### ۴- حل عددی و بررسی استقلال از گام زمانی و تعداد

##### گره محاسباتی

شکل ۳، بررسی استقلال از شبکه را نشان می‌دهد. شبکه‌های محاسباتی ساختاریافته دارای توزیع یکنواخت با تعداد سلول ۴۹۰۰، ۳۶۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۶۰۰، تولید و تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع و همچنین حداکثر دمای دیواره گرم، مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد سلول ۳۶۰۰ (شکل ۲) جواب‌های قابل قبول و در عین حال تعداد حداقل سلول محاسباتی را داراست. علاوه بر این، در شکل ۴، استقلال از گام زمانی بررسی و گام زمانی برابر ۰/۴ ثانیه، انتخاب شده است.



شکل ۲: شبکه محاسباتی با ۳۶۰۰ سلول

شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent صورت گرفته است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود بهره می‌گیرد. به منظور

مدل‌ها و روابط موجود برای پیش‌بینی نفوذپذیری شبکه متخلخل فلزی محدود هستند. در واقع، به دلیل توزیع فضایی پیچیده اتصالات شبکه فلزی، پیش‌بینی نفوذپذیری دشوار است. در مطالعه حاضر، نفوذپذیری شبکه متخلخل، با استفاده از رابطه تجربی پرکاربرد ارائه شده در مرجع [۲۲] مدل‌سازی می‌شود. این رابطه به صورت زیر قابل بیان است:

$$\kappa = 0.00073 d_p^2 (1 - \phi)^{-0.224} \left( \frac{d_{Mtlf}}{d_p} \right)^{-1.11} \quad (7)$$

مقاومتی که در برابر حرکت سیال، توسط شبکه متخلخل، به دلیل مسیرهای پیچیده و نامنظم ایجاد می‌گردد، به‌عنوان اثر اینرسی شناخته می‌شود. این اثر با افزایش سرعت PCM مایع بیشتر می‌شود. ضریب اینرسی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\epsilon = 0.00212 (1 - \phi)^{-0.132} \left( \frac{d_{Mtlf}}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (8)$$

که در آن  $d_p$  قطر حفره و  $d_{Mtlf}$  قطر الیاف شبکه متخلخل هستند و آن‌ها را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} d_p = \frac{0.0254}{\omega} \\ \frac{d_{Mtlf}}{d_p} = 1.18 \left( \frac{1 - \phi}{3\pi} \right)^{0.5} \left[ 1 - \exp\left( \frac{\phi - 1}{0.04} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

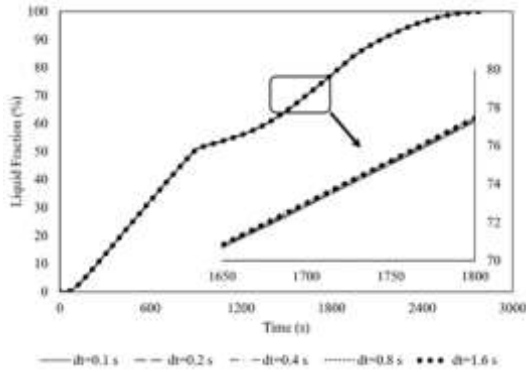
که در آن  $\omega$ ، تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI) است.

##### معادله انرژی:

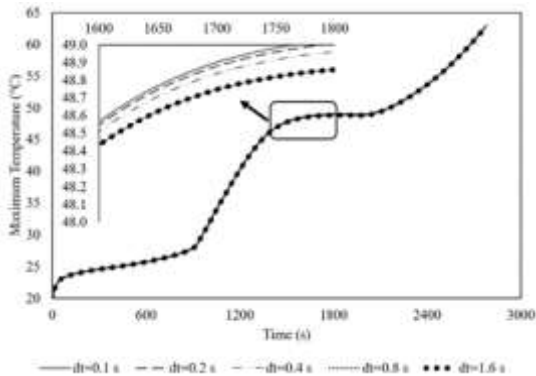
تعداد گرمایی محلی بین شبکه متخلخل فلزی و PCM فرض شده است. بنابراین، معادله انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۳]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} T)}{\partial t} + \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} UT)}{\partial x} + \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} VT)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (\phi \rho_{PCM} \xi L_f)}{\partial t} \end{aligned} \quad (10)$$

در اینجا،  $L_f$ ،  $k_{eff}$  و  $(\rho C_p)_{eff}$  به ترتیب بیانگر گرمای نهان ذوب/انجماد PCM و پارامترهای ترموفیزیکی مؤثر شبکه متخلخل فلزی پُر شده با PCM هستند. خواص ترموفیزیکی مؤثر شبکه متخلخل



(الف)



(ب)

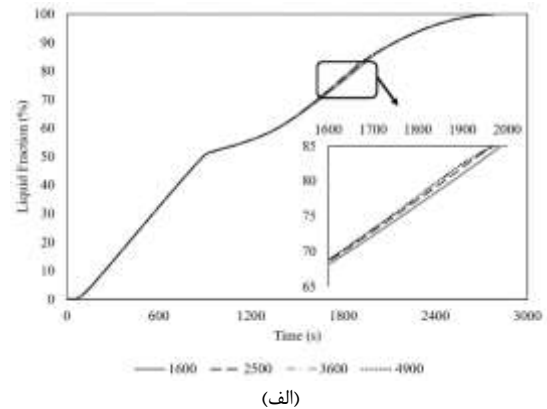
شکل ۴: بررسی استقلال از گام زمانی (الف) تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع (ب) تغییرات زمانی حداکثر دمای دیواره گرمکن

### ۵- اعتبارسنجی نتایج

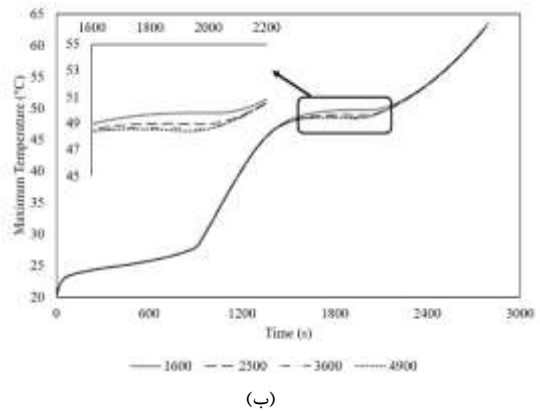
به منظور ارزیابی صحت نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر، نتایج این پژوهش با نتایج گزارش شده در مطالعه تجربی الجتلاح<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] و مطالعه عددی یاچاچنه<sup>۴</sup> و همکاران [۲۲] مقایسه شده است. در این پژوهش‌ها، فرآیند تغییر فاز روغن نارگیل، درون شبکه متخلخل آلومینیومی بررسی شده است. ابعاد حفره مستطیلی به صورت دوعبده، برابر با  $5 \text{ cm} \times 7/2 \text{ cm}$  بوده است. دیواره عمودی تحت شارهای گرمایی  $1814 \text{ W/m}^2$  و  $2835 \text{ W/m}^2$  قرار گرفته و سایر دیواره‌ها، آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. شبکه فلزی دارای تخلخل  $0/92$  و تراکم حفره  $5\text{PPI}$  است.

شکل ۵ تغییرات کسر حجمی مذاب (فاز مایع)، روغن نارگیل خالص را در دو حالت، با شارهای گرمایی متفاوت نشان می‌دهد.

تعیین خواص محیط متخلخل، از تابع‌نویسی در نرم‌افزار MS Excel استفاده شده است. روش فشار-مبنا<sup>۱</sup> برای حل معادلات حاکم استفاده گردید. برای حل معادلات مومنتوم و انرژی از روش بالادست مرتبه اول و برای معادله تصحیح فشار از روش PRESTO! استفاده شده به‌منظور کوپل معادلات فشار-سرعت از روش PISO بهره گرفته شده است. ضرایب تخفیف<sup>۲</sup> برای مؤلفه‌های سرعت، تصحیح فشار و انرژی به ترتیب  $0/7$ ،  $0/3$  و  $1$  در نظر گرفته شدند. معیارهای همگرایی برای معادلات بقای جرم و مومنتوم  $10^{-3}$  و برای معادله انرژی  $10^{-6}$  تنظیم شدند.



(الف)



(ب)

شکل ۳: بررسی استقلال از شبکه محاسباتی (الف) تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع (ب) تغییرات زمانی حداکثر دمای دیواره گرمکن

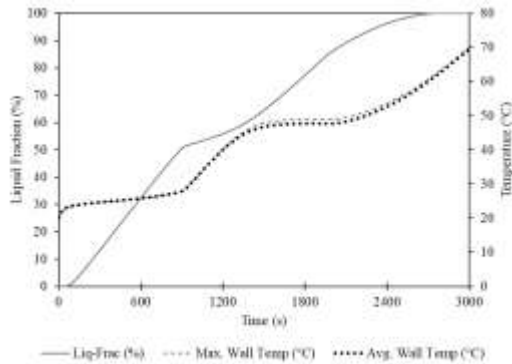
<sup>3</sup> Al-jethelah

<sup>4</sup> Iachachene

<sup>1</sup> Pressure-based

<sup>2</sup> Relaxation factors

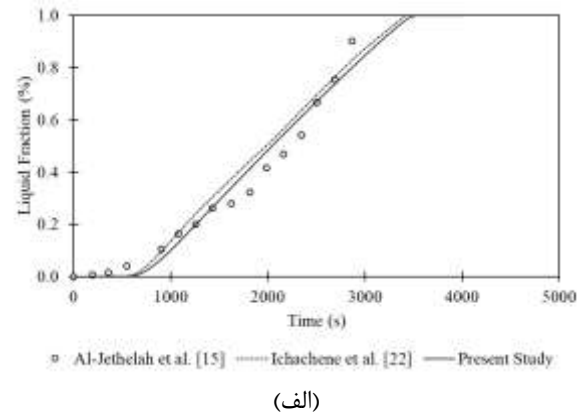
تمام ماده تغییرفازدهنده، ترسیم شده است. برای حالت پایه، حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین، برابر  $1/31^{\circ}\text{C}$  بوده که بین ثانیه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۸۰ رخ داده است. در این حالت، زمان لازم برای ذوب تمام ماده تغییرفازدهنده درون محفظه برابر ۲۷۸۰ ثانیه است.



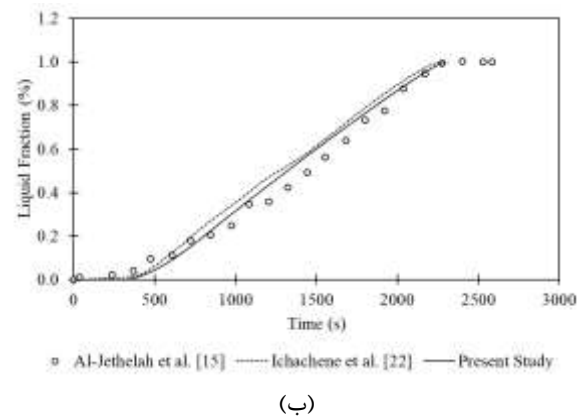
شکل ۶: تغییرات کسر حجمی فاز مایع، دمای حداکثر و دمای میانگین دیواره گرم در طول زمان تا ذوب تمام ماده تغییرفاز دهنده برای حالت پایه

در شکل ۷، سه لحظه از فرآیند ذوب، لحظات ابتدایی، لحظات میانی و لحظات پایانی به تصویر کشیده شده است. این لحظات نقاط تغییر شیب دمای ماکزیمم نمودار شکل ۶ نیز هستند. در لحظات ابتدایی، انتقال گرما، بیشتر بر اساس مکانیزم رسانش رخ می‌دهد اما رفته‌رفته با گسترش جبهه مذاب، مکانیزم همرفت قالب شده و انتقال گرما و در نتیجه سرعت فرآیند ذوب افزایش می‌یابد. در لحظات پایانی فرآیند ذوب، با توجه به اینکه فاز جامد در پایین محفظه قرار گرفته است، دوباره، رسانش گرمایی نقش بیشتری ایفا می‌کند. بر این اساس، با مقایسه شکل ۶ و شکل ۷، تغییرات شیب خط کسر حجمی مذاب در طول زمان قابل توجیح است. بر اساس نتایج این بخش، لازم است محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل، مورد مطالعه قرار گیرد زیرا محیط متخلخل تأثیرات گوناگونی بر روند انتقال گرما دارد. از یک‌سو، این شبکه فلزی دارای نقش پُل گرمایی است و همچنین مقدار جرم ماده تغییرفازدهنده را در آن ناحیه کمتر می‌کند و از سوی دیگر، وجود شبکه متخلخل فلزی می‌تواند منجر به یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در آن ناحیه گردد. اما محیط متخلخل، تضعیف‌کننده مکانیزم همرفت نیز هست. لذا اگر محیط متخلخل در نزدیکی دیواره گرم باشد، می‌تواند منجر به کاهش دمای حداکثر دیواره گردد و اما اگر ناحیه پایینی محفظه را پوشش دهد، منجر به کاهش جرم ماده تغییرفازدهنده در آن ناحیه و در نتیجه کوتاه‌تر شدن زمان کل فرآیند ذوب می‌گردد. بنابراین در بخش بعد به بررسی اثر محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل، اعم از چپ، بالا، راست و پایین پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که هدف، ذوب تمام ماده تغییرفازدهنده در محفظه است.

مشاهده می‌شود که نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج مراجع [۱۵] و [۲۲] مطابقت خوبی دارد.



(الف)



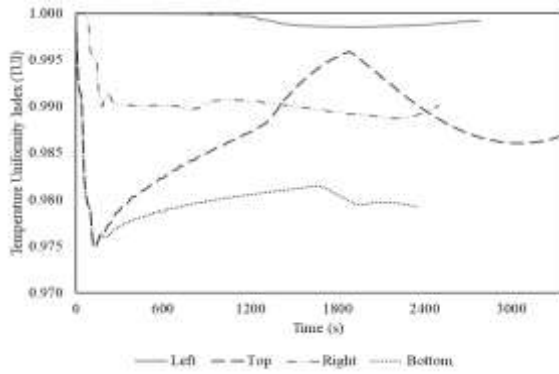
(ب)

شکل ۵: مقایسه تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر با مراجع [۲۲] و [۱۵] (الف) به‌ازای شار  $1814 \text{ W/m}^2$  و (ب) به‌ازای شار  $2825 \text{ W/m}^2$

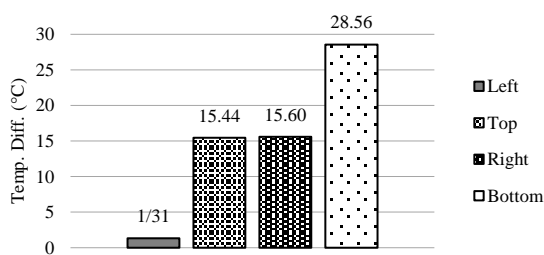
## ۶- نتایج

### ۶-۱- بررسی حالت پایه

به منظور مقایسه اثر پارامترهای مختلف، هندسه‌ای دوبعدی با مشخصات  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ، شار دیواره گرم (دیواره سمت چپ محفظه) برابر  $3000 \text{ W/m}^2$ ، تخلخل  $\phi = 0/9$  با  $\text{PPI} = 10$  و محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل در سمت چپ، به عنوان حالت پایه در نظر گرفته شده است. در محفظه‌های با دیواره شار ثابت، تمام دیواره گرم، دارای توزیع دمای یکسانی نیست لذا چنانچه از ماده تغییرفازدهنده به عنوان سیال خنک‌کاری استفاده شود (مانند چاه گرمایی برای CPU [۲۵] یا لپ‌تاپ [۲۶])، دمای برخی از نقاط دیواره گرم می‌تواند از حد مجاز فراتر روند. در این پژوهش، مطابق شکل ۶، دمای میانگین دیواره گرم و دمای ماکزیمم آن در طول زمان، تا ذوب

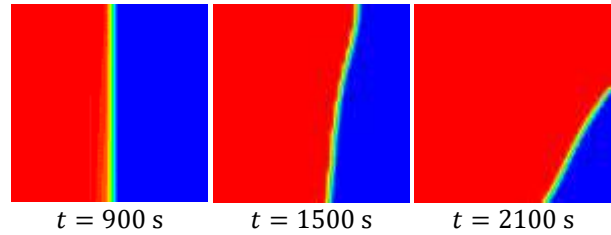
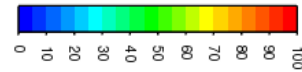


شکل ۸: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل در طول زمان



شکل ۹: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل

چنانچه محیط متخلخل نزدیک به دیواره شار ثابت (سمت چپ) باشد، مقدار TUI تقریباً ثابت و نزدیک به ۱ است، به این معنی که توزیع دما در این ناحیه در طول زمان، تقریباً یکنواخت باقی مانده است. موقعیت بالا برای محیط متخلخل، بیشترین تغییرات در TUI را نشان می‌دهد. ابتدا کاهش داشته و سپس روند افزایشی داشته است. همچنین زمان ذوب نیز به شدت افزایش یافته است. حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، در این حالت مقدار متوسط را در بین این چهار حالت داشته و برابر ۱۵/۴۴ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت راست برای محیط متخلخل، تغییرات متوسطی در TUI دارد و نسبت به دیواره بالا یکنواخت‌تر باقی می‌ماند. موقعیت پایین و بالا، کمترین مقدار TUI را در کل زمان‌ها دارند، اما موقعیت بالا، این غیریکنواختی را در طول زمان جبران می‌کند در عوض موقعیت پایین، کمترین زمان ذوب را دارد اما طبق بیشترین حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین را داراست.



شکل ۷: کانطور کسر حجمی مذاب در سه زمان مختلف برای حالت پایه

## ۲-۶- بررسی اثرات محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل

نیمی از هندسه دارای شبکه فلزی متخلخل پُر شده از ماده تغییرفازدهنده و نیمی دیگر تماماً از ماده تغییرفازدهنده پُر شده است. برای آنکه جرم ماده تغییرفازدهنده در تمامی موارد ثابت بماند، شبکه فلزی در تمامی حالات، دارای تخلخل ۰/۹۰ است. در این قسمت به بررسی اثرات محل قرارگیری شبکه فلزی، اعم از چپ (نزدیک به دیواره گرم)، بالا، پایین و راست پرداخته شده است. یکی از ملاک‌های عملکرد مطلوب محیط متخلخل در این پژوهش، بر اساس هرچه یکنواخت‌تر بودن توزیع دما در دیواره گرم با شار ثابت است. برای این منظور "شاخص یکنواختی توزیع دما" به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$TUI = 1 - \frac{\int_A |T - T_{avg}| dA}{\int_A T_{avg} dA} \quad (13)$$

لذا هرچه این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، توزیع دما یکنواخت‌تر و عملکرد محیط متخلخل در این زمینه مطلوب‌تر است.

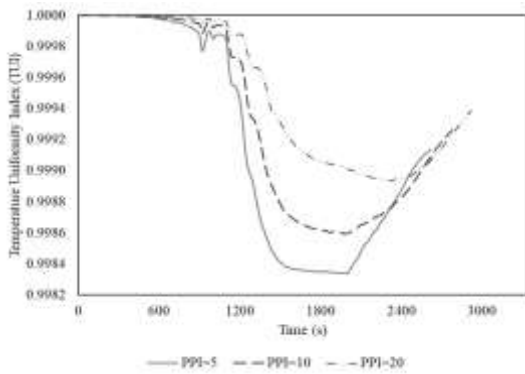
شکل ۸ تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) را به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل، اعم از چپ، بالا، راست و پایین، در طول زمان، تا ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده، نشان می‌دهد. در شکل ۹، تأثیر محل قرارگیری محیط متخلخل بر روی حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای دیواره گرم، بررسی شده است.

<sup>1</sup> Temperature Uniformity Index

شکل ۱۰، کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان را به‌ازای مکان قرارگیری مختلف شبکه متخلخل، در زمانی نشان می‌دهد که شاخص TUI دارای حداقل مقدار خود است. این زمان به‌ازای محل قرارگیری چپ، بالا، راست و پایین به‌ترتیب ثانیه ۱۶۰، ۱۶۰، ۸۰۰ و ۲۳۰۰ است. از آن‌جایی که محل قرارگیری پایین در زمان دیرتری به TUI حداقل رسیده است، دمای دیواره بیشترین مقدار را داراست.

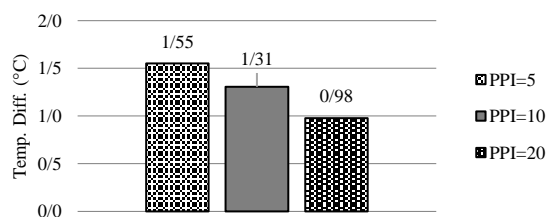
### ۳-۶- بررسی اثرات تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI)

در این بخش به اثرات تغییر PPI پرداخته می‌شود. هندسه همان هندسه حالت پایه است اما در این بخش افزایش و کاهش دوبرابری PPI، نسبت به نمونه شاهد، بررسی شده است. شکل ۱۱ به بررسی این عامل بر روی TUI می‌پردازد.

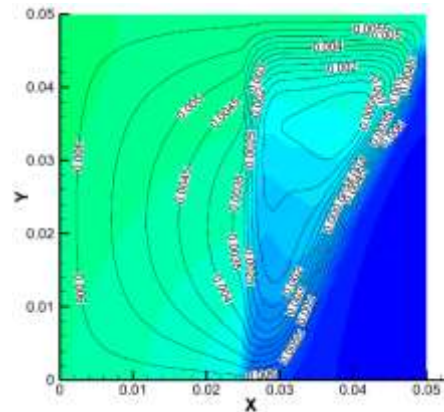


شکل ۱۱: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای PPI مختلف در طول زمان

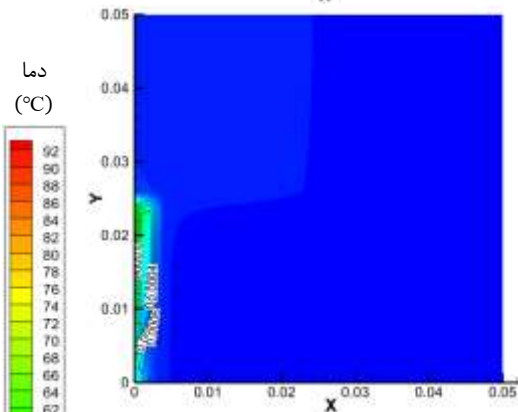
مشهود است با افزایش PPI، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما از طرفی زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزاینده افزایش می‌یابد که مطلوب نیست. علت را می‌توان در تضعیف مکانیزم همرفت با افزایش PPI دانست. همچنین بر اساس شکل ۱۲، با افزایش PPI، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، کاهش می‌یابد زیرا عملکرد محیط متخلخل به عنوان پل گرمایی، با افزایش PPI، تقویت می‌شود.



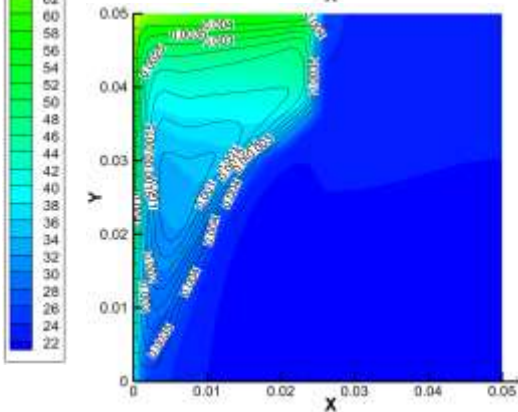
شکل ۱۲: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای PPI مختلف



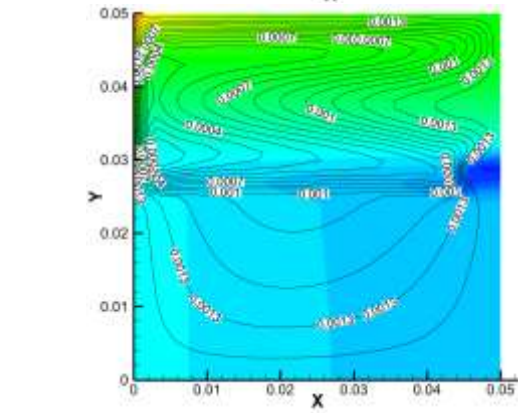
چپ (ثانیه ۱۶۰)



بالا (ثانیه ۱۶۰)



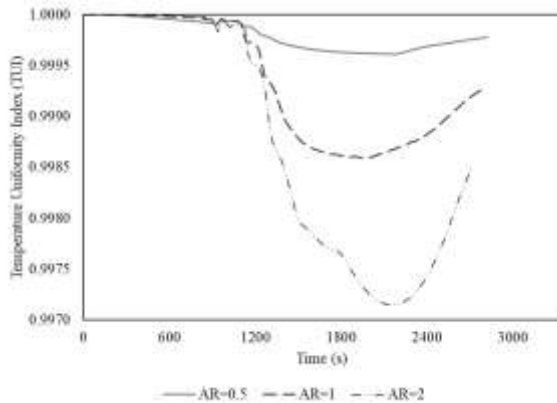
راست (ثانیه ۸۰۰)



پایین (ثانیه ۲۳۰۰)

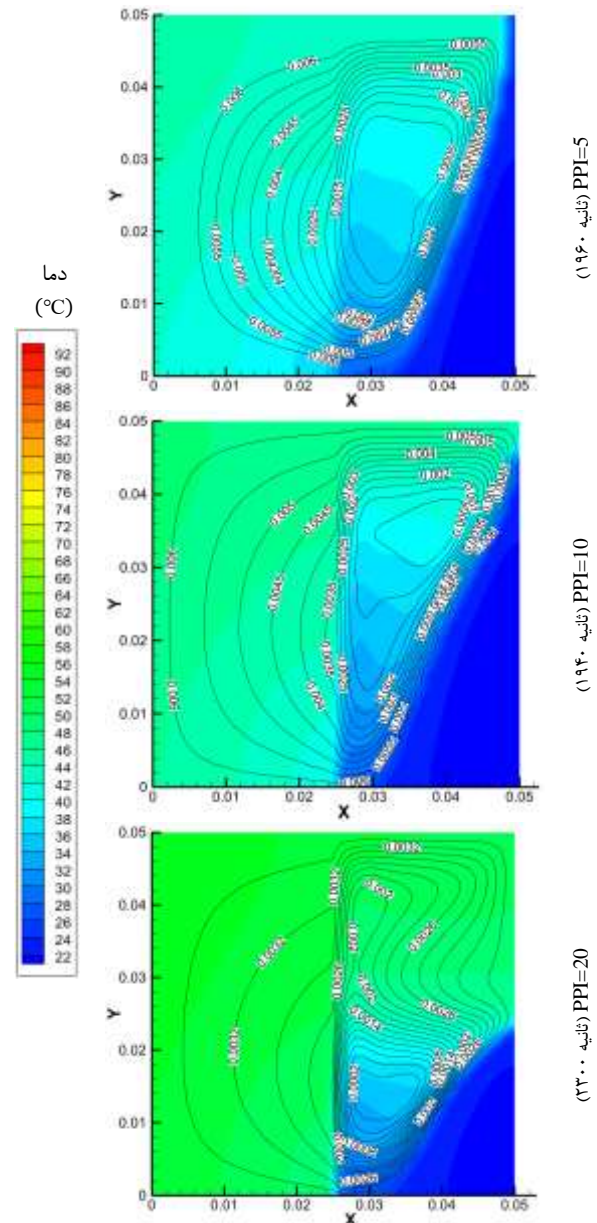
شکل ۱۰: کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان به‌ازای کمترین TUI برای مکان‌های قرارگیری مختلف شبکه متخلخل

با حالت پایه یکسان باشد، ابعاد محفظه با نسبت منظری ۲ و ۰/۵ به ترتیب برابر  $۷/۰۷۱۱ \text{ cm} \times ۳/۵۳۵۵ \text{ cm}$  و  $۷/۰۷۱۱ \text{ cm} \times ۳/۵۳۵۵ \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به تغییر ابعاد دیواره گرم در دو نسبت منظری مختلف، برای یکسان بودن نرخ گرمای ورودی به سیستم، شار گرمایی برای نسبت منظری ۰/۵ و ۲، به ترتیب  $۳۰۰۰ \times \sqrt{۲} \text{ W/m}^2$  و  $۳۰۰۰/\sqrt{۲} \text{ W/m}^2$  اعمال شده است.



شکل ۱۴: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای نسبت منظری مختلف در طول زمان

در شکل ۱۴، مشهود است با افزایش AR، شاخص یکنواختی دما کمتر می شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییر فزاینده تغییر چندانی نمی کند. همچنین بر اساس شکل ۱۵، با افزایش AR، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه ای، افزایش می یابد. با افزایش AR، طول دیواره گرم بیشتر می شود. از طرفی، مکانیزم مهم انتقال گرما از دیواره (خنک کاری آن) جابجایی آزاد است. لذا با افزایش AR، اختلاف ضخامت لایه مرزی بین بالا و پایین دیواره بیشتر گردیده لذا مقاومت حرارتی در نزدیک دیواره بیشتر شده پس با توجه شار ثابت بودن دیواره، اختلاف دمای آن بیشتر می گردد و شاخص TUI کاهش می یابد. در تأیید این مطلب با مراجعه به شکل ۱۴، از زمانی که مکانیزم جابجایی اطراف دیواره، فعال تر می گردد (حدود ثانیه ۱۲۰۰ به بعد) اختلاف بین شاخص های TUI برای نسبت منظری های مختلف، بیشتر می شود. در مجموع میزان گرمای ورودی ثابت است (تغییر شار گرمایی متناسب با تغییر مساحت دیواره) بنابراین، نرخ کلی انتقال حرارت به PCM چندان تغییر نکرده و زمان لازم برای ذوب کامل تقریباً ثابت می ماند.

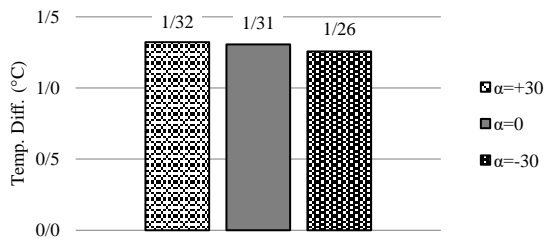


شکل ۱۳: کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان به ازای کمترین TUI برای محل مقادیر مختلف PPI

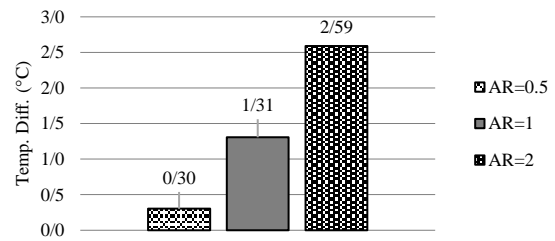
شکل ۱۳، کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان را به ازای مقادیر مختلف PPI، در زمانی نشان می دهد که شاخص TUI دارای حداقل مقدار خود است. این زمان به ازای PPI برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ به ترتیب ثانیه ۱۹۶۰، ۱۹۴۰ و ۲۳۰۰ است. از آنجایی که مورد با PPI=20 در زمان دیرتری به TUI حداقل رسیده است، دمای دیواره بیشترین مقدار را داراست و جبهه مذاب بیشترین پیشروی را داشته است.

#### ۶-۴- بررسی اثرات نسبت منظری محفظه

نسبت منظری (AR) به صورت حاصل تقسیم ارتفاع محفظه به طول ضلع دیگر، تعریف می گردد. برای آنکه جرم داخل محفظه در مقایسه



شکل ۱۷: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای زاوایای صفر، +۳۰ و -۳۰- محفظه نسبت به افق



شکل ۱۵: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای نسبت منظری مختلف

### ۶-۶-۱- بهینه‌یابی به کمک روش تاگوچی

از آنجایی که برخی از پارامترهای بررسی شده در بخش‌های قبل، دارای اثر دوگانه بودند، یعنی برخی از آن‌ها به‌طور همزمان باعث افزایش/کاهش زمان ذوب و شاخص یکنواختی دما می‌شدند و از طرفی حالات ترکیبی آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج جدید شود، لذا برای یافتن مورد بهینه از بین ترکیب  $3^4 = 81$  حالت موجود، از روش تاگوچی بهره جسته شده است. هدف، کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرفازدهنده و در عین حال یکنواخت نگه‌داشتن توزیع دما در دیواره گرم شار ثابت است. از آنجایی نتایج بخش‌های قبل نشان داد که کاهش حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای با شاخص توزیع یکنواخت دما، رابطه‌ای مستقیم دارد، به جای TUI، حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای به عنوان دومین شاخص انتخاب شده است. بدین منظور زمان‌ها به صورت  $\tau = t/3600$ ، نُرمال شده و اختلاف دماها بر حسب کلین به صورت  $\theta = \Delta T_{max}/T_0$  نُرمال شده‌اند که در آن  $\Delta T$ ، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای و  $T_0$  دمای اولیه بر حسب کلین است. بنابراین هدف، کمینه‌کردن حاصل  $\theta \times \tau$  خواهد بود.

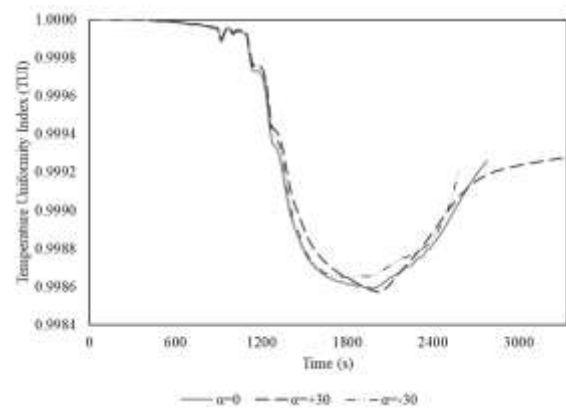
روش تاگوچی، یک تکنیک طراحی آزمایش است که به‌طور سیستماتیک تأثیر عوامل مختلف و سطوح آن‌ها را بر یک خروجی (پاسخ) بررسی می‌کند. این روش از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای تحلیل عملکرد تحت شرایط مختلف استفاده می‌کند و با استفاده از آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را کاهش می‌دهد. رابطه S/N بسته به هدف آزمایش (کوچکتر بهتر، بزرگتر بهتر، اسمی بهترین است)، تغییر می‌کند. با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر، رویکرد "کوچکتر بهتر" انتخاب شده است. لذا داریم [۲۷]:

$$S/N = -10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (14)$$

### ۶-۶-۲- بررسی اثرات زاویه محفظه نسبت به افق

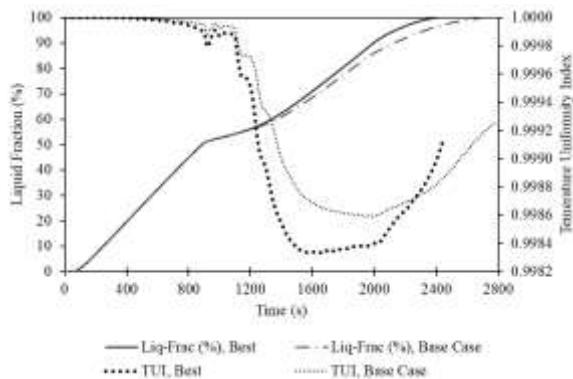
در این پژوهش، زاویه نسبت به افق ( $\alpha$ ) چنانچه ساعتگرد باشد، مثبت، و چنانچه پادساعتگرد باشد، منفی بیان می‌گردد. اثرات تغییر زاویه صفر درجه، +۳۰° و -۳۰° نسبت به افق مطالعه شده است.

بر اساس شکل ۱۶، تغییر زاویه تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده بسیار مؤثر است به‌طوری که زمان ذوب کامل به ازای زاویه  $\alpha = -30^\circ$  حدود ۴۰٪ کمتر نسبت به زاویه  $\alpha = +30^\circ$  است. علت این امر، زودتر فعال شدن مکانیزم جابجایی آزاد و تقویت این مکانیزم در طول مدت ذوب به‌ازای  $\alpha = -30^\circ$  است. با توجه به شکل ۱۷، تغییر زاویه محفظه نسبت به افق، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای را تغییر چشمگیری نمی‌دهد با این حال باز هم این اختلاف، به ازای زاویه  $\alpha = -30^\circ$  از دو مورد دیگر کمتر است. شاخص TUI بیشتر تحت تأثیر ضخامت لایه مرزی اطراف دیواره (مقاومت حرارتی) و شار دیواره است. با توجه به اینکه این دو مورد با تغییر زاویه، چندان تغییر نمی‌کنند لذا شاخص TUI به  $\alpha$  وابستگی اندکی دارد.



شکل ۱۶: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای زاوایای صفر، +۳۰ و -۳۰- محفظه نسبت به افق در طول زمان

نسبت منظری برابر یک و زاویه نسبت به افق برابر  $\alpha = -30^\circ$  باشد. با توجه به اینکه مورد فوق در ۹ مورد جدول روش تاگوچی نبود، برای بررسی صحت، این مورد شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این حالت زمان لازم برای ذوب کل ماده تغییرنازدهنده برابر ۲۴۴۰ ثانیه و حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای برابر  $1/56^\circ\text{C}$  است لذا مقدار تابع هدف برای این مورد برابر  $\theta \times \tau = 0.6351$  است که کمترین مقدار در بین تمامی موارد شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات کسر حجمی فاز مایع و شاخص یکنواختی توزیع دما در طول زمان برای نمونه بهینه و حالت پایه

شکل ۱۹، تغییرات کسر حجمی فاز مایع و شاخص یکنواختی توزیع دما را در طول زمان برای نمونه بهینه و نمونه شاهد نشان می‌دهد. در این حالت TUI نسبت به حالت پایه، کمتر از  $0.03\%$  بدتر شده اما زمان ذوب  $13/9\%$  کاهش یافته است. تا حدود ثانیه ۱۲۰۰، عملکرد هر دو مورد چه از نظر کسر حجمی مایع و چه از منظر TUI، مشابه است. حالت پایه حوالی ثانیه ۱۹۸۰ و مورد بهینه حوالی ثانیه ۱۶۶۰ کمترین مقدار TUI را دارد.

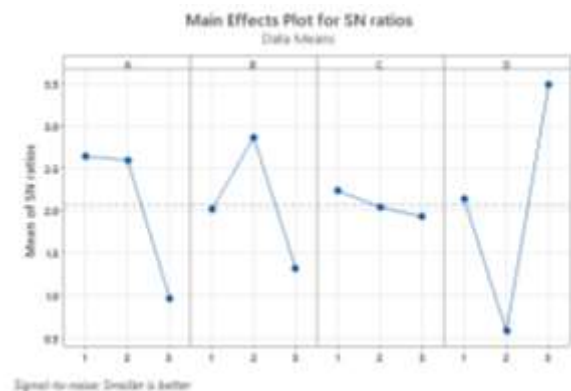
در شکل ۲۰، برای این دو لحظه مذکور، توزیع دما، تابع جریان و کسر حجمی مایع بین حالت پایه و مورد بهینه مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در مورد بهینه، با اینکه زمان کمتری گذشته است اما مکانیزم همرفت قدرت بیشتری دارد لذا این امر موجب اختلاط بهتر و در نتیجه کاهش TUI و حتی کاهش دمای کل فاز مایع و دیواره شده است. این نتیجه در نمودار شکل ۲۱، کاملاً مشهود است

که در آن  $\gamma_i$  مقدار پاسخ در تکرار  $i$  و  $n$  تعداد آزمایش‌ها برای هر سطح است.

جدول ۲: سطوح مختلف متغیرهای مورد مطالعه برای روش تاگوچی برای آنالیز L9 و مقادیر تابع هدف

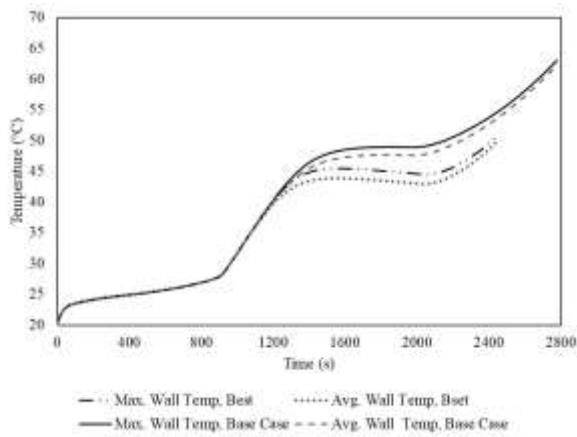
ردیف	محل محیط متخلخل	PPI	AR	$\alpha$	$\tau \times \theta$
۱	چپ	۱۰	۱	صفر	۰/۷۲۳۰
۲	چپ	۵	۲	+۳۰	۰/۸۰۱۳
۳	چپ	۲۰	۰/۵	-۳۰	۰/۶۹۳۹
۴	راست	۱۰	۲	-۳۰	۰/۶۳۵۷
۵	راست	۵	۰/۵	صفر	۰/۶۸۲۲
۶	راست	۲۰	۱	+۳۰	۰/۹۴۰۷
۷	بالا	۱۰	۰/۵	+۳۰	۱/۰۸۶۰
۸	بالا	۵	۱	-۳۰	۰/۶۷۹۶
۹	بالا	۲۰	۲	صفر	۰/۹۶۹۹

جدول ۲ سطوح مختلف متغیرهای مورد مطالعه را برای روش تاگوچی برای آنالیز L9 را به همراه مقادیر تابع هدف ( $\tau \times \theta$ ) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است بر اساس آنچه که در بخش‌های پیشین بیان شد، چنانچه محیط متخلخل در پایین محفظه باشد، نه از نظر زمان کل ذوب ماده تغییرنازدهنده و نه از منظر حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای، عملکرد مناسبی را به دست نمی‌دهد لذا به علت محدودیت روش تاگوچی و به منظور برابری سطوح تمام متغیرها، سطح محل قرارگیری پایین محیط متخلخل، در مطالعه با روش تاگوچی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۱۸: مقادیر نسبت سیگنال به نویز

بر اساس نتایج مندرج در شکل ۱۸، روش تاگوچی موردی را که از منظر کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرنازدهنده و کمینه حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای باشد، حالتی می‌داند که محیط متخلخل در سمت چپ محفظه بوده،  $PPI=5$ ،



شکل ۲۱: مقایسه تغییرات کسر دمای ماکزیمم و دمای میانگین دیواره گرم در طول زمان برای نمونه بهینه و حالت پایه

### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ویژگی‌های شبکه نیمه‌متخلخل فلزی بر نرخ ذوب ماده تغییرفازدهنده و یکنواختی دمای دیواره، به روش عددی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. خلاصه نتایج عبارتند از:

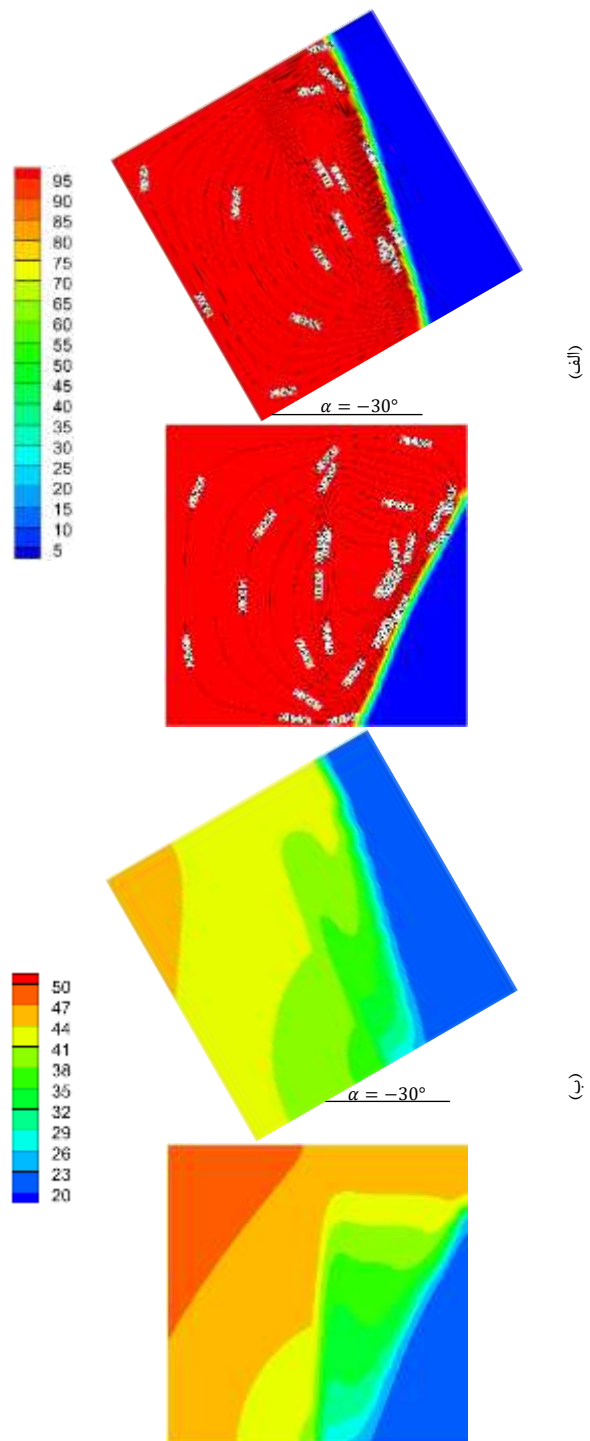
۱- از منظر محل قرارگیری محیط متخلخل، چنانچه این شبکه فلزی در پایین محفظه باشد، از نظر TUI بدترین عملکرد را دارد اما از نظر زمان ذوب، نسبت به بقیه محل‌های قرارگیری کمترین زمان را داراست. چنانچه محیط متخلخل سمت بالای محفظه باشد، بیشترین بازه تغییر TUI و زمان ذوب را شاهد خواهیم بود.

۲- با افزایش PPI، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش PPI، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش AR، شاخص یکنواختی دما کمتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین با افزایش AR، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، افزایش می‌یابد.

۴- تغییر زاویه تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده بسیار مؤثر است.

۵- بر اساس روش تاگوچی، مورد بهینه از منظر کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرفازدهنده و کمینه TUI، حالتی است که محیط متخلخل در سمت چپ محفظه بوده (نزدیک به دیواره گرم)،  $PPI=5$ ، نسبت منظری برابر یک و زاویه نسبت به افق برابر  $\alpha = -30^\circ$  باشد. در این حالت زمان لازم برای ذوب کل ماده تغییرفازدهنده برابر ۲۴۴۰ ثانیه



شکل ۲۰: (الف) کانتور کسر حجمی فاز مایع (%) و خطوط تابع جریان (ب) توزیع دما (°C) برای نمونه بهینه و حالت پایه در زمان کمترین مقدار TUI برای هر نمونه (مورد بهینه در ثانیه ۱۶۶۰ و حالت پایه در ثانیه ۱۹۸۰)

<https://books.google.com/books?id=N8LGwUNYWX8C>

[2] H. Mehling, M. Brütting, and T. Haussmann, "PCM products and their fields of application—An overview of the state in 2020/2021," *J. Energy Storage*, vol. 51, p. 104354, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104354](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104354)

[3] V. Goel *et al.*, "PCM-assisted energy storage systems for solar-thermal applications: Review of the associated problems and their mitigation strategies," *J. Energy Storage*, vol. 69, p. 107912, 2023. doi: [10.1016/j.est.2023.107912](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107912)

[4] A. Atal, Y. Wang, M. Harsha, and S. Sengupta, "Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 9–16, 2016. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033)

[5] A. Iranmanesh, A. Ghorbani, and H. Farzan, "Numerical study of the effect of stepped fins on improving the performance of a thermal storage system in the presence of an intermediate plate and porous medium," *Eng. Energy Manage.*, vol. 2345–2951, 2025. (in Persian). doi: [10.22052/eem.2025.255727.1093](https://doi.org/10.22052/eem.2025.255727.1093)

[6] H. Bahrami and M. Saberi, "Numerical investigation of the use of solid or porous fins to improve heat transfer in a two-tube heat exchanger containing PCM, suitable for satellite thermal management," *Aerospace Knowledge and Technology*, vol. 93, pp. 9–16, 2025. (in Persian). [Online]. Available: [https://www.astjournal.ir/article\\_711413\\_7eb5cd6882c7fcf4d5c20dca365d64dc.pdf](https://www.astjournal.ir/article_711413_7eb5cd6882c7fcf4d5c20dca365d64dc.pdf)

[7] S. Poran and D. H. Ahmed, "Effect of cavity shape and heat source/sink orientation on PCM melting," *J. Therm. Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324219075>

[8] X. Hu, P. Chen, X. Guo, and X. Zhang, "Comparative studies on the thermal performance of novel PCM-based heat sinks using 3D-printed thermal conductivity enhancers," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 162, p. 108613, 2025. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613)

و حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای برابر  $1/56^{\circ}\text{C}$  است.

## ۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، $\text{m}^2$
AR	نسبت منظری
$C_p$	گرمای ویژه، $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	قطر، m
g	شتاب جاذبه، $\text{m}/\text{s}^2$
k	ضریب رسانش گرمایی، $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$L_f$	گرمای نهان ذوب، $\text{J}/\text{kg}$
P	فشار، Pa
q"	شار گرمایی، $\text{W}/\text{m}^2$
t	زمان، s
T	دما، K
TUI	شاخص یکنواختی توزیع دما
U و V	سرعت به ترتیب در راستاهای x و y، $\text{m}/\text{s}$
x و y	جهات مختصات، m
علائم یونانی	
$\alpha$	زاویه ساعتگرد محفظه نسبت به افق، Deg
$\beta$	ضریب انبساط گرمایی، $1/\text{K}$
$\epsilon$	ضریب اینرسی محیط متخلخل
$\theta$	دمای بی‌بعد
$\kappa$	ضریب تراوایی محیط متخلخل، $\text{m}^2$
$\mu$	لزجت دینامیکی، Pa.s
$\xi$	کسر حجمی فاز مایع (مذاب)
$\omega$	تعداد حفره‌های شبکه متخلخل در یک اینچ
$\rho$	چگالی، $\text{kg}/\text{m}^3$
$\tau$	زمان نُرمال شده
$\phi$	تخلخل
زیرنویس	
0	اولیه
avg	میانگین
eff	خاصیت مؤثر
max	حداکثر
MtLF	الیاف فلزی شبکه متخلخل
liq	فاز مایع ماده تغییرفازدهنده
p	حفره شبکه متخلخل
pcm	ماده تغییرفازدهنده
sld	فاز جامد ماده تغییرفازدهنده

## ۹- منابع

[1] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available:

- [17] A. Martínez *et al.*, “Experimentally based testing of the enthalpy-porosity method for the numerical simulation of phase change of paraffin-type PCMs,” *J. Energy Storage*, vol. 69, p. 107876, 2023. doi: [10.1016/j.est.2023.107876](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107876)
- [18] Y. Xu, M.-J. Li, Z.-J. Zheng, and X.-D. Xue, “Melting performance enhancement of phase change material by a limited amount of metal foam: Configurational optimization and economic assessment,” *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 868–880, 2018. doi: [10.1016/j.apenergy.2017.12.082](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.082)
- [19] P. Zhang, X. Xiao, and Z. Ma, “A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 472–510, 2016. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.12.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.043)
- [20] P. Knupp and J. Lage, “Generalization of the Forchheimer-extended Darcy flow model to the tensor permeability case via a variational principle,” *J. Fluid Mech.*, vol. 299, pp. 97–104, 1995. doi: [10.1017/S0022112095003430](https://doi.org/10.1017/S0022112095003430)
- [21] B. J. Jones, D. Sun, S. Krishnan, and S. V. Garimella, “Experimental and numerical study of melting in a cylinder,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 15–16, pp. 2724–2738, 2006. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.006](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.006)
- [22] F. Iachachene, Z. Haddad, E. Abu-Nada, and M. A. Sheremet, “Natural convection melting of phase change material in corrugated porous cavities,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 53, p. 102734, 2022. doi: [10.1016/j.seta.2022.102734](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102734)
- [23] J. Guo, Z. Du, G. Liu, X. Yang, and M.-J. Li, “Compression effect of metal foam on melting phase change in a shell-and-tube unit,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 206, p. 118124, 2022. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118124](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118124)
- [24] H. M. Ali, M. M. Janjua, U. Sajjad, and W.-M. Yan, “A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 135, pp. 649–673, 2019. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001)
- [9] X. Hu *et al.*, “Comparative studies on thermal management performance of PCM-based heat sinks filled with various height structured porous materials,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 263, p. 125376, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.125376](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125376)
- [10] M. Ghalambaz *et al.*, “Melting process of the nano-enhanced phase change material (NePCM) in an optimized design of shell and tube thermal energy storage (TES): Taguchi optimization approach,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, p. 116945, 2021. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.116945](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116945)
- [11] M. Ghalambaz *et al.*, “Phase-transition thermal charging of a channel-shape thermal energy storage unit: Taguchi optimization approach and copper foam inserts,” *Molecules*, vol. 26, no. 5, p. 1235, 2021. doi: [10.3390/molecules26051235](https://doi.org/10.3390/molecules26051235)
- [12] Y. Liu *et al.*, “Role of porous metal foam on temperature control and thermal runaway propagation of integrated battery thermal management systems,” *Appl. Therm. Eng.*, p. 125712, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2025.125712](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125712)
- [13] J. C. Kurnia *et al.*, “Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) wall insulator utilizing Taguchi method,” *J. Energy Storage*, vol. 49, p. 104067, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104067](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104067)
- [14] A. Kotb and S. Wang, “Enhanced thermal storage performance with non-linear porosity distribution in copper foam-PCM composites,” *J. Energy Storage*, vol. 105, p. 114612, 2025. doi: [10.1016/j.est.2024.114612](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114612)
- [15] M. Al-Jethelah *et al.*, “Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: An experimental investigation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 148, pp. 1029–1042, 2019. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121)
- [16] S. Zhang *et al.*, “A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110127, 2021. doi: [10.1016/j.rser.2020.110127](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110127)

---

[27] A. Freddi and M. Salmon, "Introduction to the Taguchi method," in *Design principles and methodologies: from conceptualization to first prototyping with examples and case studies*, Springer, pp. 159–180, 2019. doi: [10.1007/978-3-319-95342-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95342-7_7)

[25] R. Sinaga *et al.*, "CPU cooling system based on phase changing material (PCM): Parafin wax," *AIP Conf. Proc.*, 2024. doi: [10.1063/5.0201066](https://doi.org/10.1063/5.0201066)

[26] F. Farhan, R. M. Gul, and K. Akhtar, "Passive Cooling System for Laptop Computers using Phase Change Materials," 2024. doi: [10.21203/rs.3.rs-4139275/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4139275/v1)