

Experimental and Numerical Investigation of the Effects of Metal Fibers on Heat Conduction in Phase Change Materials

Mohammad Jowzi ¹, Jafar Jamaati ^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Iran

* Email address: j.jamaati@razi.ac.ir

ABSTRACT

Several methods have been proposed to enhance the thermal conductivity coefficient of phase change materials. In this study, the effect of incorporating metallic fibers on the enhancement of thermal conductivity in PCMs is investigated through both experimental and numerical approaches. The impact of fiber material, diameter, length, and volume fraction on the conductive heat transfer performance of PCMs has been investigated. Experimental results demonstrate that the addition of a small volume fraction of metallic fibers (approximately 2%) can improve the thermal conductivity of PCMs by up to four times. In two identical experimental setups, replacing steel fibers with copper fibers resulted in a 55% increase in thermal conductivity. The numerical results indicate that increasing the volume fraction of fibers from 2.35% to 3.9% leads to an improvement of more than 50% in the effective thermal conductivity. On the other hand, increasing the orientation angle of the fibers by 15 degrees relative to the direction of heat flow results in a 31% decrease in thermal conductivity. This study also presents a novel approach for evaluating the microstructure of fibrous composites and determining their effective thermal conductivity.

KEYWORDS

Energy Storage, Phase Change Material, Metal Fibers, Effective Thermal Conductivity, Anisotropic Materials

1. Introduction

Global energy demand is projected to increase by over 40% by 2050 [1], necessitating the development of efficient thermal energy storage (TES) systems to support energy management. Latent heat storage using phase change materials (PCMs) is particularly promising due to its high energy density, but the low thermal conductivity of PCMs remains a significant limitation. Various enhancement techniques, including fins, nanoparticles, and metal foams, have been widely studied. For instance, fins and nanoparticles have been shown to reduce charging and solidification times [2], while metal foams enhance thermal conductivity at the cost of natural convection and energy density [3, 4]. In contrast, the use of metal fibers for thermal enhancement has received less attention, despite advantages such as low cost and ease of integration. Previous studies indicate that metal fibers can significantly improve discharge rates and heat transfer performance [5, 6], with some showing conductivity improvements of up to 300% [7]. However, a systematic investigation into the effective thermal conductivity of fibrous composites is still lacking. This study aims to fill that gap by experimentally and numerically evaluating the influence of fiber type, volume fraction, diameter, and orientation on the thermal performance of paraffin-based fibrous composites.

2. Methodology

2.1 Experimental Setup

To accurately measure the effective thermal conductivity of the paraffin and metal fiber composite, an experimental setup compliant with ASTM E1225-04 standard was used. This comparative indirect method does not require direct measurement of heat flux and is suitable for relatively large specimens. The main components of the setup include a heat source and a heat sink with a temperature control unit, a cylindrical chamber containing the fibrous composite, placed between two paraffin meter bars, elastomeric insulation to minimize heat losses, and several temperature sensors to measure the temperature distribution along the specimens. Under steady-state and one-dimensional heat transfer conditions, the effective thermal conductivity of the specimen is calculated from the equation (1).

$$k_{eff} = \frac{x_5 - x_3}{T_5 - T_3} \times \frac{k_m}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} + \frac{T_7 - T_6}{x_7 - x_6} \right) \quad (1)$$

Where k_m is the thermal conductivity of the reference material.

2-2. Microstructure Analysis

A key innovation of this paper is a method to analyze the microstructure of fibrous composites. Since cutting paraffin-based specimens without altering their structure is difficult, the experimental methodology used resin/epoxy samples of identical configuration instead. The samples were cut, polished, and photographed with an optical microscope. They were then processed using “ImageJ” software to quantify the cross-sectional area and effective angle of the fibers relative to the cutting plane. Figure 1 shows an example of processed experimental data for microstructure analysis.

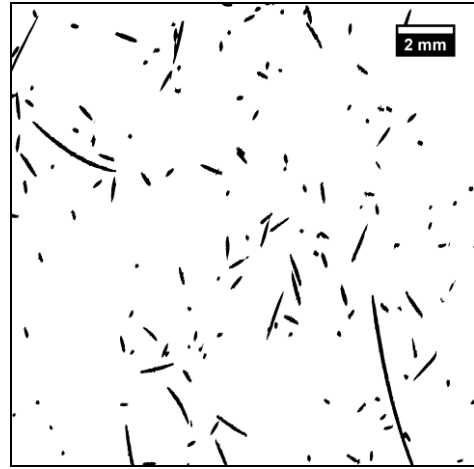


Figure 1. A processed image of the cross-sectional of the copper fiber/resin composite using ImageJ software

Then in numerical method, due to geometric complexity, a Java code was written to generate random 3D geometries of fibrous composite with various parameters. Figure 2 shows the output of the numerical model for generating and analyzing random fiber structures.

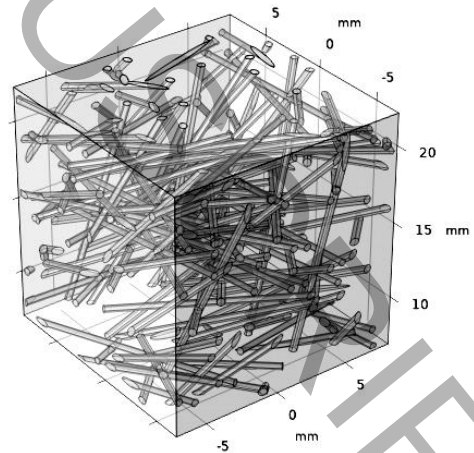


Figure 2. 3D numerical model of the fibrous composite

3. Results and Discussion

Figure 3 shows the steady-state temperature distribution for a Paraffin/Copper fibrous composite, which was placed between heat sources at 60°C and 5°C. Steady-state conditions were reached after 6 hours. Temperatures T_1 – T_7 refer to the thermocouples that are located along the specimen and meter bars. Using the data in Figure 3 and applying equation (1), the effective thermal conductivity for this specimen is measured to be 0.74 W/m.K, representing a 253% increase over that of pure paraffin.

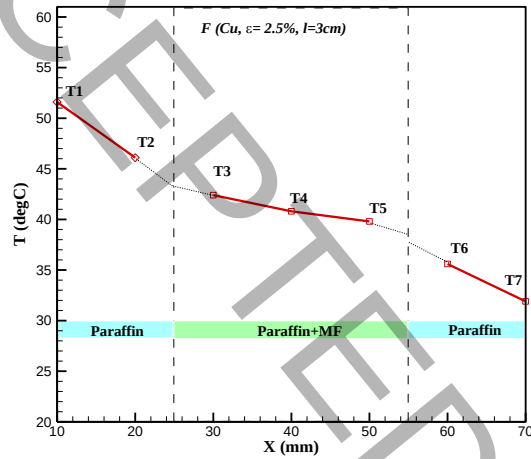


Figure 3. Steady-state temperature distribution for a Paraffin/Copper fibrous composite.

The length of metal fibers is another characteristic that can influence the effective thermal conductivity of a fibrous composite. Therefore, in addition to the experimental investigation of two specimens (which have the same fiber volume fraction, diameter, and arrangement but different lengths), numerical data were also used to investigate the subject more precisely. As shown in Figure 4, numerical and experimental results for copper/paraffin composites show strong agreement. Conductivity increases markedly with longer fibers and higher volume fractions.

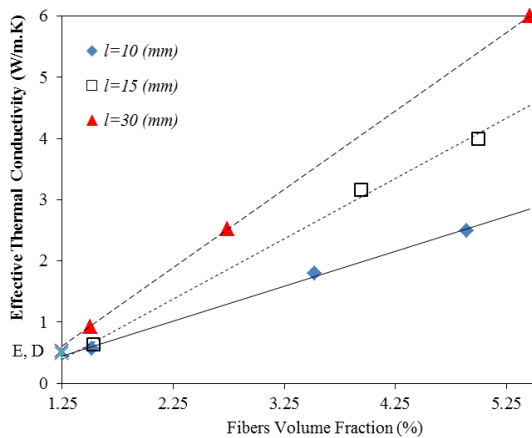


Figure 4. The effect of length and volume fraction of copper fibers on the effective thermal conductivity of a fibrous composite ($d = 0.15$ mm).

The reason for this phenomenon can be understood by studying the 2D temperature contour in a fibrous composite. The temperature contours are converging near the metal fibers, as shown in Figure 5. As seen; fibers were placed in the direction of heat transfer, which will increase the heat transfer.

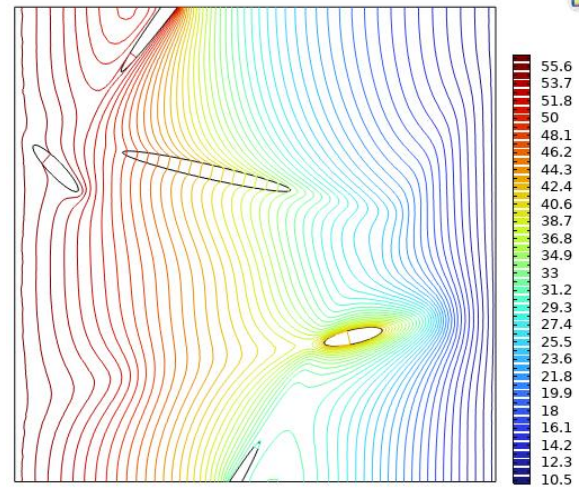


Figure 5. Steady-state temperature distribution of a fibrous composite in the solid state

4. Conclusion

The effective thermal conductivity of paraffin/metal fiber composites was experimentally and numerically investigated. Adding just 2% metal fibers increased thermal conductivity by up to 4 times. A newly proposed effective fiber angle parameter and analytical model accurately described the behavior of irregular fibrous structures. Results confirmed that fiber material, orientation, and volume fraction are dominant factors, with a 50% conductivity increase when increasing fiber content from 2.35% to 3.9%, and a 31% decrease when the fiber orientation angle increased by 15°. Metal fibers are a cost-effective and highly efficient method for enhancing the thermal properties of phase change materials.

5. References

- [1] P. IEA, World energy outlook 2022, Paris, France: International Energy Agency (IEA), (2022).
- [2] M. Alizadeh, M.H. Shahavi, D.D. Ganji, Performance enhancement of nano PCM solidification in a hexagonal storage unit with innovative fin shapes dealing with time-dependent boundary conditions, Energy Reports, 8 (2022) 8200-8214.
- [3] C.R. Abujas, A. Jové, C. Prieto, M. Gallas, L.F. Cabeza, Performance comparison of a group of thermal conductivity enhancement methodology in phase change material for thermal storage application, Renewable energy, 97 (2016) 434-443.
- [4] J. Chen, D. Yang, J. Jiang, A. Ma, D. Song, Research progress of phase change materials (PCMs)

embedded with metal foam (a review), *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 389-394.

[5] J. Gasia, J.M. Maldonado, F. Galati, M. De Simone, L.F. Cabeza, Experimental evaluation of the use of fins and metal wool as heat transfer enhancement techniques in a latent heat thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, 184 (2019) 530-538.

[6] C. Prieto, C. Rubio, L.F. Cabeza, New phase change material storage concept including metal wool as heat transfer enhancement method for solar heat use in industry, *Journal of Energy Storage*, 33 (2021) 101926.

[7] M. Jowzi, J. Jamaati, Experimental Study of the Effect of Adding Metal Fibers (With Different Lengths, Diameters, Materials, and Porosity) On Improving the Thermal Conductivity of Phase Change Materials, *The Second International Conference on Computer, Electrical, Mechanical and Engineering Sciences*, 2025. (in Persian).

بررسی تجربی و عددی تأثیر افزودن الیاف فلزی در بهبود انتقال حرارت هدایت مواد تغییر فاز دهنده

محمد جوزی^۱، *جعفر جماعتی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

j.jamaati@razi.ac.ir

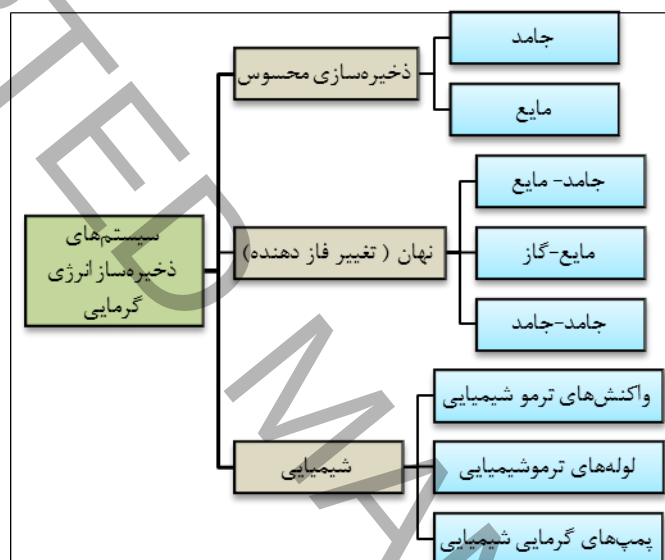
چکیده

روش‌های متعددی برای ارتقاء ضریب انتقال حرارت هدایت مواد تغییر فاز دهنده پیشنهاد شده است. در این مقاله تأثیر استفاده از الیاف فلزی برای بهبود انتقال حرارت هدایت در مواد تغییر فاز دهنده به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. در همین راستا، اثر جنس، قطر، طول و کسر حجمی الیاف فلزی در بهبود انتقال حرارت هدایت مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده است. نتایج تجربی نشان داد که با افزودن کسر حجمی بسیار کمی الیاف فلزی (حدود دو درصد) می‌توان ضریب انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده را تا ۴ برابر بهبود بخشید. در دو نمونه‌ی آزمایشی یکسان، هنگامی که از الیاف مسی بجای الیاف استیل استفاده شود ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده ۵۵ درصد بهبود می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۲/۳۵ تا ۳/۹ درصد ضریب انتقال حرارت مؤثر بیش از ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت و هنگامی که زاویه‌ی مؤثر الیاف با راستای انتقال حرارت ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، ضریب انتقال حرارت مؤثر ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. در کار حاضر یک روش جدید برای مطالعه‌ی ریزساختار ترکیبات دوفاز فیبری و تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر آن‌ها ارائه شده است.

کلمات کلیدی

ذخیره انرژی، تغییر فاز دهنده، الیاف فلزی، ضریب انتقال حرارت، مواد غیرهمسانگرد.

تا سال ۲۰۵۰ میلادی تقاضا برای مصرف انرژی بیش از چهل درصد افزایش می‌یابد [۱]. با توجه به محدودیت سوخت‌های فسیلی و سیاست‌های مرتبط با کنترل تغییرات اقلیمی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و حرارتی نقش بسیار پررنگی در آینده خواهند داشت. این سیستم‌ها برای پیک‌سایی و یا ایجاد پایداری عرضه انرژی منابع تجدیدپذیر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. برگشت‌پذیری، ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی، پایداری شیمیایی، انتقال حرارت مناسب و هزینه‌های بهره‌برداری پایین از مهمترین ویژگی‌های مورد انتظار برای سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارت است. سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارت از نظر فرایند ذخیره‌سازی انرژی در سه دسته کلی قرار می‌گیرند که در شکل ۱ این دسته‌بندی و زیر دسته‌های آنها نشان داده شده است [۲]. به فرایندی که ذخیره‌سازی انرژی با تغییر فاز ماده ذخیره‌ساز همراه است، ذخیره‌سازی نامحسوس (نهان) انرژی گفته می‌شود. مواد به کار رفته در این فرایند را مواد تغییر فاز دهنده^۱ می‌نامند. این مواد از نظر ساختار شیمیایی به مواد ارگانیک و غیر ارگانیک تقسیم می‌شوند. ضریب انتقال حرارت هدایت در اغلب مواد تغییر فاز دهنده اندک است. از این رو روش‌های تقویت خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده با اضافه کردن اکسیدهای فلزی، فوم‌های فلزی، الیاف فلزی، الیاف کربنی و سطوح گسترش یافته موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است.



شکل ۱. دسته‌بندی انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارت [۲]

Fig. 1. Classification of thermal energy storage systems [2]

علیزاده و همکاران [۳] فرایند ذوب در یک ماده تغییر فاز دهنده تقویت شده با سه نوع پرهی حرارتی را به صورت عددی بررسی کردند. با استناد به نتایج ارائه شده در این مقاله می‌توان گفت؛ وجود پره‌های حرارتی تا سی درصد زمان شارژ مجدد ماده تغییر فاز دهنده را کاهش می‌دهد. آن‌ها علاوه بر پره‌های حرارتی تأثیر افزودن نانو ذرات اکسید مس را نیز بررسی کردند. طبق پژوهش انجام شده، با افزودن چهار درصد حجمی نانو ذره، زمان انجماد کامل ماده تغییر فاز دهنده تا چهارده درصد کاهش می‌یابد. البته پیچیدگی ساختار پره‌های پیشنهاد شده در این مقاله عملاً امکان ساخت را محدود می‌سازد و فاقد قابلیت‌های کاربردی است. رایز و همکاران [۴] با ساخت چهار نمونه آزمایشی تأثیر آرایش فویل‌های آلومینیومی بر عملکرد حرارتی ماده تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. نتایج تجربی و تحلیل عددی آن‌ها نشان داد که وجود فویل آلومینیوم ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده را تا ۰/۶۳ وات بر متر در کلون افزایش و زمان تغییر فاز را نیز کاهش می‌دهد. عبیدی و همکاران [۵] با استفاده از یک مدل عددی دو بعدی تأثیر پره‌های داخلی و خارجی برای یک سیستم ذخیره انرژی سه لوله‌ای با مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها ثابت کرد که تعداد، طول و ضخامت پره‌ها بر زمان ذوب و انجماد کامل ماده تغییر فاز دهنده تأثیر مستقیم دارد.

^۱ Phase Change Material (PCM)

مبدل‌های حرارتی یکی از مهم‌ترین سیستم‌های حرارتی هستند که امکان استفاده از مواد تغییر فاز دهنده را دارند. ژانگ و همکاران [۶] تأثیر پره‌های حرارتی و فوم‌های فلزی بر ضریب انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی را بررسی کردند. طبق تحلیل آن‌ها اثر استفاده همزمان از پره‌های حرارتی و فوم‌های فلزی بیشتر از زمانی است که تنها از یک روش بهره‌برداری گردد. صفوی و همکاران [۷] تأثیر حرارتی دو نوع پره حرارتی از نوع مثلثی و حلقوی را مطالعه و مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که فین‌های مثلثی باعث افزایش عدد ناسلت، بهبود توزیع حرارت و کاهش قابل‌توجه زمان ذوب در مقایسه با فین‌های حلقوی می‌شود. ترکیب نانو ذرات و مواد تغییر فاز دهنده از دیگر روش‌های رایج برای بهبود خواص حرارتی این مواد است. معصومی و همکاران [۸] یک مبدل حرارتی پوسته لوله افقی که برای بهبود راندمان حرارتی آن از ترکیب پره‌های حرارتی طولی، اسید سیتریک و نانو ذرات اکسید تیتانیوم استفاده شده بود را به صورت تجربی و عددی تحلیل نمودند. طبق نتایج آن‌ها وجود پره‌های حرارتی زمان ذوب را پنجاه و چهار درصد و زمان انجماد را هفتاد و شش درصد کاهش می‌دهد. این در حالی است که با افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم به ماده تغییر فاز دهنده، زمان ذوب و انجماد به ترتیب شش و هشت درصد کاهش می‌یابد. لورا کولا و همکاران [۹] تأثیر افزودن نانو اکسید آلومینیوم و گرافیت را به پارافین بررسی کردند. طبق نتایج به‌دست آمده ضریب انتقال حرارت حدود بیست و پنج درصد بهبود یافت و دمای فوق‌سرمایش^۱ پارافین نیز کاهش پیدا کرد. امین و همکاران [۱۰] با افزودن نانو ذرات گرافن به موم زنبور عسل، گرمای نهان ذوب را بیش از بیست درصد و ضریب انتقال حرارت هدایتی را تا ۲/۸ وات بر متر در کلون افزایش دادند که برای مواد تغییر فاز دهنده عدد بالایی است.

اثر افزودن نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی یک ماده تغییر فاز دهنده موضوع مطالعات متعددی بوده است. در تمامی کارهای انجام شده قبلی، ضریب انتقال حرارت متناسب با درصد نانو ذرات افزایش پیدا کرده است. ضریب انتقال حرارت ترکیب نانو ذرات و یک فاز پیوسته با استفاده از معادله‌ی ماکسول محاسبه می‌شود [۸، ۱۱].

$$k_{eff} = \left(k_1 \phi_1 + k_2 \phi_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2} \right) / \left(\phi_1 + \phi_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2} \right) \quad (1)$$

که در آن زیروند ۱ و ۲ به ترتیب به جزء پیوسته (تغییر فاز دهنده) و نانو ذرات اشاره دارد و ϕ درصد حجمی هر جزء نسبت به حجم کل است. باید توجه داشت یکی از مهم‌ترین چالش‌های ترکیبات حاوی نانوذرات ته‌نشین شدن ذرات طی چرخه‌های متمادی ذوب و انجماد است که باید برای رفع این مشکل به روش‌های فعال یا غیرفعال چاره‌اندیشی شود. یک راه‌حل برای رفع چالش ته‌نشینی نانو ذرات استفاده از بسترهای آکنده^۲ از میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده است. میکرو کپسول‌سازی به فرایندی گفته می‌شود که طی آن یک حجم بسیار کوچک از ماده تغییر فاز دهنده با یک پوشش (غشای نازک) محصور می‌گردد. فرایند میکروکپسول‌سازی به دو روش فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود. روش فیزیکی با اسپری کردن هم‌زمان ماده تغییر فاز دهنده و پوشش پلیمری و سپس خشک کردن قطرات با اسپری هوای خشک انجام می‌شود. اندازه دانه‌بندی در این روش متناسب با اندازه قطرات پاششی خواهد بود اما برای تولید دانه‌بندی‌های ریزتر باید از روش‌های شیمیایی بهره جست. مواد تغییر فاز دهنده کپسول شده بر اساس قطر به سه گروه ماکرو، میکرو (تا ۱ میلی‌متر) و نانو (تا هزار نانومتر) دسته‌بندی می‌شوند [۱۲]. لی و همکاران [۱۳] با انجام تحلیل‌های عددی، تأثیر انتقال حرارت هدایت و انتقال حرارت جابجایی روی سطح کپسول‌های تغییر فاز دهنده را درون یک بستر آکنده بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها استفاده از نانو کپسول‌های تغییر فاز دهنده یک روش مؤثر در بهبود عملکرد حرارتی سیستم است.

فوم فلزی^۳ یک ساختار فلزی است که کسر حجمی زیادی از آن دارای تخلخل است. این مواد نسبت سطح به حجم بسیار بالایی دارند و به همین دلیل می‌توانند موجب افزایش ضریب انتقال حرارت مؤثر مواد تغییر فاز دهنده شوند. کارلوس آجویاس و همکاران [۱۴] تأثیر فوم گرافیت با سه تراکم مختلف بر عملکرد حرارتی و زمان ذوب کامل سدیم نیترات را به‌صورت عددی بررسی و با هم مقایسه کردند. در این پژوهش از فوم‌های بسیار متراکم که حدود پنجاه درصد فضای ذخیره‌سازی انرژی را اشغال می‌کردند استفاده

^۱ Super Cooling

^۲ Packed Bed

^۳ Metal Foam

شده بود. طبق نتایج آن‌ها زمان شارژ ماده تغییر فاز دهنده با وجود فوم گرافیت از حدود سی و پنج ساعت به سی دقیقه کاهش یافت. البته با توجه به تراکم بالای فوم گرافیت، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی سیستم به شکل محسوسی کاهش یافت. ژوانگ و همکاران [۱۵] با تحلیل عددی یک مدل سه‌بعدی متخلخل فوم فلزی و پارافین به روش آنتالپی-تخلخل^۱ به بررسی تأثیر درصد تخلخل بر روی خواص ترموفیزیکی ترکیب پرداختند. طبق نتایج آن‌ها با افزایش درصد تخلخل، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی ترکیب افزایش می‌یابد. در همین راستا مطالعه تجربی خرم‌نژاد و همکاران [۱۶] تأثیر ادغام محیط‌های متخلخل با مواد تغییر فاز دهنده در چاه‌های حرارتی را بررسی می‌کند. نتایج نشان داد که استفاده از محیط‌های متخلخل حتی با تخلخل نود و پنج درصد، عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی را تا دو درصد بهبود می‌بخشد. آن‌ها گزارش کردند علی‌رغم اثرگذاری بالای فوم‌های فلزی، اما نوع ماده تغییر فاز دهنده تأثیر بیشتری بر روی پاسخ زمانی شارژ و تخلیه سیستم ذخیره‌ساز انرژی دارد. کریمی و همکاران [۱۷] از کوئل مارپیچی و فوم فلزی مس برای بهبود ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در مواد تغییر فاز دهنده استفاده کردند. طرح پیشنهادی آن‌ها که سطح تماس بین ماده تغییر فاز دهنده و سیال عامل را افزایش می‌داد، موجب کاهش زمان شارژ و تخلیه سیستم حرارتی تا پنجاه و هفت درصد می‌شد. نعمت‌پور و همکاران [۱۸] به‌طور تجربی به بررسی روش‌های مختلف بهبود انتقال حرارت، از جمله استفاده از نانوذرات، فوم‌های فلزی و سطوح گسترش‌یافته، در یک کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ترکیب این روش‌ها به‌طرز چشم‌گیری عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، استفاده همزمان از فوم‌های فلزی و نانوذرات منجر به کاهش حدوداً هفده درصدی زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده شد، در حالی که پره‌های حرارتی تنها بهبود هفت درصدی را در پی داشت. فوم‌های فلزی اگرچه ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر مواد تغییر فاز دهنده را بهبود می‌بخشند، اما به دلیل ساختار درهم‌تنیده موجب از بین رفتن جریان‌های طبیعی و حذف انتقال حرارت جابجایی درون فاز مایع می‌گردند. جریان‌های طبیعی ناشی از جابجایی آزاد عامل مؤثری در پیشرفت جبهه‌ی مذاب در فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده است [۱۹]. شایان ذکر است فوم‌های فلزی ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی سیستم را کاهش می‌دهند.

همان‌گونه که قبل‌تر بیان شد، استفاده از سطوح گسترش‌یافته، نانوذرات، فوم‌های فلزی و پره‌های حرارتی برای تقویت خواص حرارتی مواد تغییر فاز دهنده موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است اما روش ترکیب الیاف فلزی و مواد تغییر فاز دهنده در مقایسه با سایر روش‌ها کمتر مطالعه شده است. این روش به دلیل هزینه‌های ساخت پایین، قابلیت اجرا در سیستم‌های حرارتی در حال بهره‌برداری و اثرگذاری مطلوب از نظر علمی قابلیت بررسی بیشتر را دارند. گاسیا و همکاران [۲۰] برای بهبود تبادل حرارت هدایتی بین یک مبدل پوسته-لوله و ماده تغییر فاز دهنده (اوکتادکان^۲) از الیاف فلزی استفاده کردند. آن‌ها با ساخت چهار نمونه‌ی آزمایشی تحت یک شرایط برابر (دما و دبی یکسان سیال عامل) تأثیر پره‌های حرارتی و الیاف فلزی را با نمونه اولیه مقایسه کردند. نتایج نشان داد؛ اگرچه الیاف فلزی در مقایسه با پره‌های حرارتی راندمان کمتری دارند اما می‌توانند زمان تخلیه سیستم حرارتی را بیش از ده درصد بهبود بخشند. از این‌رو این روش راه‌کاری کم‌هزینه برای ارتقاء عملکرد حرارتی سیستم‌های ذخیره انرژی است. پری‌تو و همکاران [۲۱] نیز به صورت تجربی و عددی به بررسی نقش الیاف فلزی فولاد کم‌کربن در بهبود ضریب انتقال حرارت نمک سدیم نترات پرداختند. نتایج نشان داد؛ وجود الیاف فلزی با تراکم بالا می‌تواند انتقال حرارت را تا سه برابر افزایش دهد. لی و همکاران [۲۲، ۲۳] انتقال حرارت یک ترکیب فیبر فولاد ضد زنگ اشباع شده با پارافین را مطالعه کردند. آن‌ها اثرات تخلخل و قطر رشته‌ها را بر روی توزیع دما و جبهه مذاب به‌صورت تجربی بررسی کردند. طبق نتایج ارائه شده در این مقاله، با افزایش محسوس تخلخل، سرعت جریان‌های طبیعی درون ماده تغییر فاز دهنده افزایش اما ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر کاهش می‌یابد. یک حد بهینه برای درصد تخلخل وجود دارد که در آن شار انتقال حرارت (مجموع انتقال حرارت جابجایی و هدایت) بیشینه است.

مطالعه‌ی اثر جنس الیاف فلزی بر زمان ذوب کامل پارافین، توسط کالیوا و همکاران [۲۴] انجام شد. آن‌ها با ساخت چند نمونه آزمایشگاهی شامل پارافین خالص، پارافین-الیاف آلومینیومی و پارافین-الیاف مسی زمان ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را تحت شرایط یکسان بررسی کردند. آن‌ها همچنین نقش درصد حجمی الیاف را بر زمان تخلیه و شارژ ماده تغییر فاز دهنده بررسی کردند.

¹ Enthalpy-Porosity method

² Octadecane ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$)

طبق نتایج تجربی درصد حجمی و جنس الیاف از عوامل بسیار مؤثر بر فرایند ذوب و انجماد است. در مقاله مورد اشاره، به ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و الیاف فلزی اشاره نشده بود. جوزی و جماعتی [۲۵] اثر الیاف فلزی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نتایج اولیه برای برخی حالات نشان از بهبود ۳۰۰ درصدی ضریب انتقال حرارت هدایت معادل بود. بررسی گسترده در مطالعات موجود نشان می‌دهد که مزایای تغییر فاز دهنده‌ها در سیستم‌های حرارتی غیرقابل انکار است اما نقاط ضعف آن‌ها مانند کم بودن رسانایی حرارتی نیاز به اصلاح دارد. در میان روش‌های مرسوم، استفاده از الیاف فلزی در ارتقاء خواص حرارتی مواد تغییر فاز دهنده کمتر از سایر روش‌ها بررسی شده است. علاوه بر آن در مطالعات پیشین به موضوع ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر ترکیبات دوفازی شامل مواد تغییر فاز دهنده و الیاف فلزی پرداخته نشده است. از این رو در این مقاله روش تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب الیاف فلزی-پارافین به روش تجربی و انطباق آن با استانداردهای موجود بررسی می‌شود. سپس تأثیر تراکم، جنس، قطر و جهت قرارگیری الیاف فلزی در بهبود انتقال حرارت به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی سامانه‌ی آزمایشی و مدل عددی

۲-۱. سامانه‌ی آزمایشی

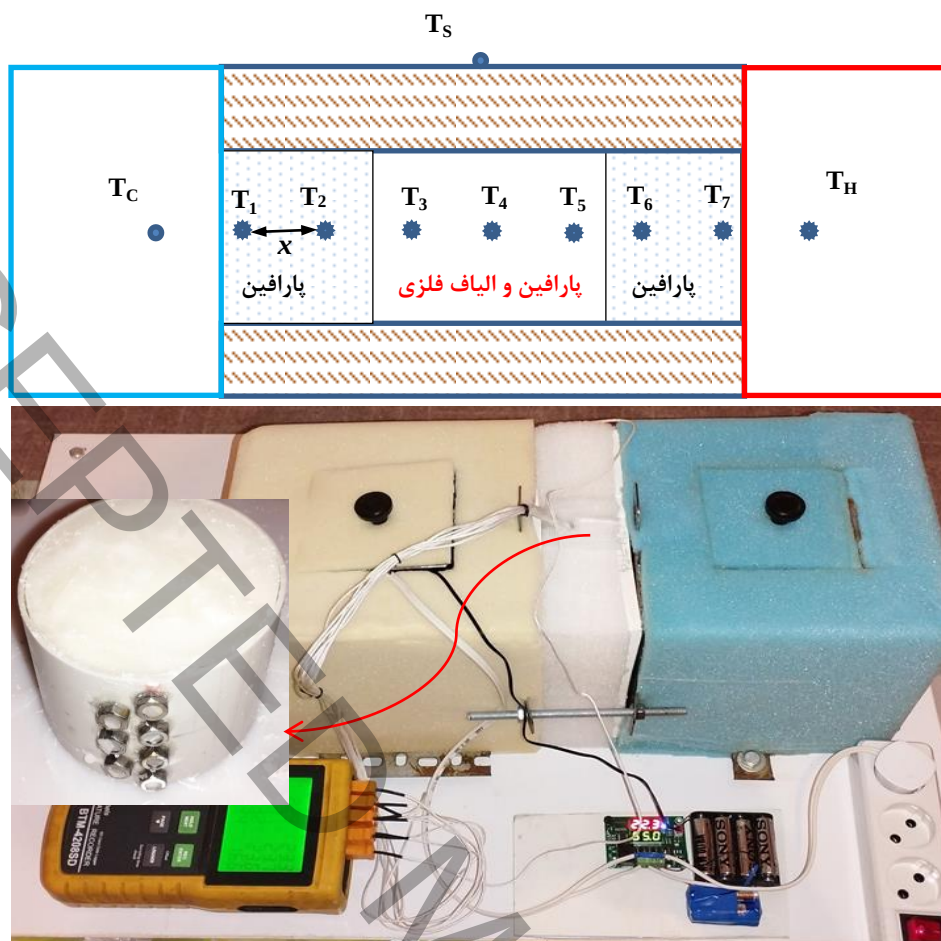
برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مواد، راه‌کارهای مختلفی با توجه به ساختار، حالت فیزیکی و ابعاد نمونه وجود دارد. روش‌های شناخته شده‌ای مانند روش صفحه‌ی داغ^۱ یا سیم داغ^۲ که مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم شار حرارتی هستند، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها برای اندازه‌گیری نمونه‌های با ابعاد کوچک مناسب هستند. بنابراین اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت یک ترکیب ناهمگن با این روش‌ها، به دلیل اثرگذاری ناهمگنی‌ها با خطا همراه است. برای رفع این چالش، در این پژوهش از روش اندازه‌گیری غیر مستقیم^۳ استفاده شده است. در روش اندازه‌گیری غیرمستقیم، نیازی به اندازه‌گیری شارگرایی نیست و امکان اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت نمونه‌های بزرگ را فراهم می‌آورد. این امکان با ساخت یک مجموعه آزمایشی طبق استاندارد E1225-04 و ایجاد شرایط مرزی پایدار فراهم شده است. به این ترتیب با این روش ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر ترکیب دوفاز الیاف فلزی و پارافین در مقایسه با پارافین خالص اندازه‌گیری شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، تمامی مراحل شامل فرآیند ساخت، داده‌برداری، تهیه گزارش‌ها و انتخاب جنس عایق‌ها و میله‌های مرجع^۴، مطابق با حدود استاندارد مذکور کنترل شده است. در شکل ۲ تصویر و شماتیک مجموعه‌ی آزمایشی نشان داده شده است. از آن‌جا که شرایطی مانند توزیع دمای پایدار، عایق بندی مناسب و خطی بودن توزیع دما در امتداد محور انتقال حرارت از شروط اصلی روش مقایسه‌ای است، در ادامه تحقق این شرایط در سامانه‌ی آزمایشی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

¹ Hot plate

² Hot wire

³ Comparative Method

⁴ Meter bars



شکل ۲. تصویری از سامانه آزمایشی

Fig. 2. An image of the experimental setup

با توجه به شکل ۲ مجموعه‌ی آزمایشی متشکل از یک منبع حرارتی و یک چاه حرارتی است که دمای آن‌ها به کمک کنترل کننده دما با دقت یک دهم کلوین کنترل می‌شود. این مخازن که به خوبی عایق شده‌اند، نوسانات دما را روی صفحات تبادل حرارت به حداقل می‌رسانند و شرایط دما ثابت در دو سمت ماده تغییر فاز دهنده ایجاد می‌گردد. هرکدام از مخازن شامل یک گرم‌کن با توان الکتریکی یک کیلووات هستند. دو سنسور دما برای ثبت دمای آب مخازن، در مرکز آن‌ها نصب شده است. محفظه‌ی استوانه‌ای حاوی ماده تغییر فاز دهنده از سه بخش تشکیل شده است. قسمت ابتدایی و انتهایی آن شامل پارافین خالص و قسمت میانی ترکیبی از ماده پارافین و الیاف فلزی است. همان‌گونه که از شکل ۲ پیداست برای ثبت توزیع دمای درون ماده تغییر فاز دهنده، دمای محیط، مخازن و سطح عایق از دوازده سنسور دما^۱ با خطای اندازه‌گیری یک دهم کلوین استفاده شده است. سنسورها و تجهیزات اندازه‌گیری دما با استفاده از محلول آب و یخ اشباع دقیق شده‌اند. برای حذف تلفات حرارتی از یک عایق الاستومری به ضخامت چهار سانتی‌متر در اطراف استوانه حاوی ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. فاصله بین سنسورهای دما درون محفظه استوانه‌ای ده میلی‌متر است و با پایه‌های پلیمری در مرکز استوانه تثبیت شده‌اند. در ضمن از سه بازوی مکانیکی برای اعمال نیروی محوری و کاهش مقاومت تماسی بین لایه‌های مختلف و همچنین صفحات فولادی دما ثابت استفاده شده است. در جدول ۱ سایر مشخصات تکمیلی مجموعه‌ی آزمایشی آمده است.

^۱ K-type thermocouple

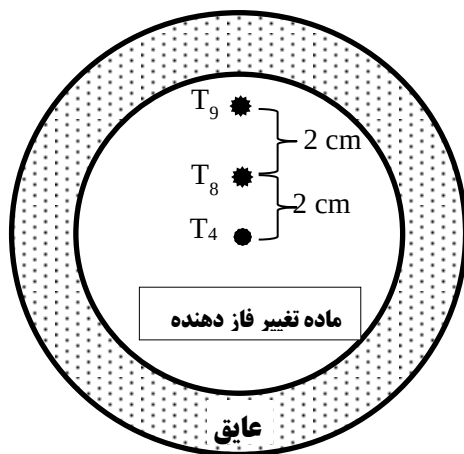
جدول ۱ مشخصات فیزیکی سامانه‌ی آزمایشگاهی
Table 1. Physical properties of the experimental setup

عنوان	مدل/نوع	مشخصات/چگالی (kg/m ³)	ضریب انتقال حرارت (W/m.K)	ابعاد/تعداد
کنترل کننده دما	W1209	با دقت یک دهم کلین		۲
ثبات دما	Lutron BTM-4208SD	دارای کارت حافظه		دارای ۱۲ کانال برای ثبت داده
عایق	الیاف الاستومری	-	۰/۰۲	-
ماده تغییر فاز دهنده	پارافین	۹۰۰	۰/۲۱ [۲۶]	دمای ذوب ۶۰ تا ۶۵ سلسیوس
الیاف فلزی مسی	-	۸۹۰۰	۳۹۸ [۲۷]	-
الیاف فولاد کم کربن ^۱	-	۷۸۵۰	۴۰ [۲۱]	-

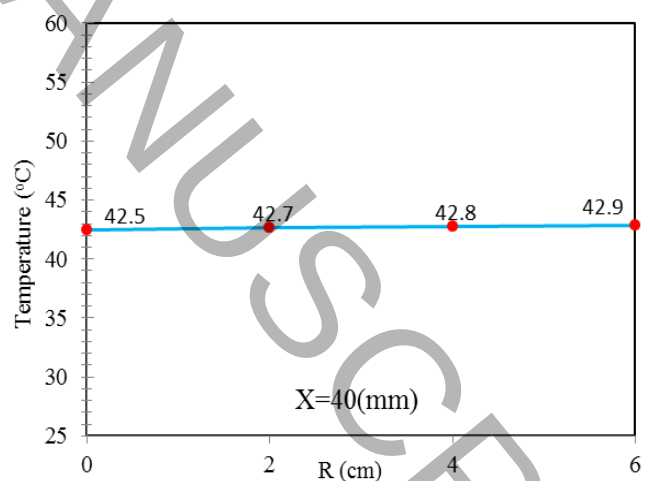
با توجه به یکسان بودن شار گرمای عبوری از نمونه مرجع و نمونه آزمایشی، ضریب انتقال حرارت هدایت نمونه مورد آزمایش طبق استاندارد E1225-4 از معادله (۲) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$k_{eff} = \frac{x_5 - x_3}{T_5 - T_3} \times \frac{k_m}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} + \frac{T_7 - T_6}{x_7 - x_6} \right) \quad (2)$$

که در آن k_m ضریب انتقال حرارت ماده مرجع، k_{eff} ضریب انتقال حرارت نمونه آزمایشی و x فاصله بین ترموکوپل‌ها است و در شکل ۲ جزئیات آن نشان داده شده است. باید توجه داشت که یک بعدی بودن هدایت حرارتی از مهم‌ترین شروط برقراری معادله (۲) است. برای بررسی این موضوع، سه عدد ترموکوپل در راستای شعاعی و در فاصله دو سانتی‌متر از هم دیگر قرار داده شده است (شکل ۳). چیدمان این سه سنسور دما به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که توزیع دما در راستای شعاعی را نمایش دهند. همان گونه که از شکل پیداست و با توجه به این که شرایط مرزی در اطراف استوانه متقارن است، می‌توان گفت که این سنسورهای دما تصویر روشنی از توزیع دما در هر مقطع نمونه‌های آزمایشی ارائه می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) توزیع دمای پایدار در راستای شعاعی استوانه (ب) طرح‌واره‌ای از چیدمان سنسورهای دما در راستای شعاعی

Fig. 3. (a) Steady state temperature distribution along the radial direction of the cylinder (b) Schematic of the thermocouples arrangement along the radial direction

¹ Low grade carbon steel (LGCS)

شکل ۳ (الف) توزیع دما در راستای شعاعی را نشان می‌دهد و هر سه سنسور دما تقریباً یک دما دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که دما در هر مقطع استوانه یکسان، انتقال حرارت به جداره ناچیز و فرض انتقال حرارت یک بعدی صحیح است. با تأیید انتقال حرارت یک بعدی در نمونه‌ها و میله‌های مرجع، می‌توان از معادله (۲) برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مؤثر نمونه‌ها استفاده کرد. در این پژوهش؛ برای بررسی تأثیر جنس، طول، قطر، تراکم و راستای رشته‌های فلزی نمونه‌های مختلفی ساخته شده است و تحت شرایط دمایی متعددی در حالت جامد، مایع، شارژ و تخلیه سیستم آزمایش شده‌اند. در جدول ۲ اطلاعات نمونه‌های ساخته شده آمده است. لازم به ذکر است که پراکندگی و راستای رشته‌ها در تمامی نمونه‌ها به صورت تصادفی است و تنها در نمونه‌ی B رشته‌ها موازی با راستای انتقال حرارت قرار داده شده‌اند.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی نمونه‌های مختلف شامل ترکیب پارافین و الیاف فلزی

Table 2. Physical properties of the Paraffin-Metal Fibers composites

عنوان	درصد حجمی الیاف فلزی	قطر (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	جنس	جرم (گرم)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
A	۱/۲۵	-	۱۰	فولاد کم‌کربن	۲۵	۹۷۲
B	۲	-	۳۰	فولاد کم‌کربن	۶۴	۱۰۳۰
C	۲	-	۳۰	فولاد کم‌کربن	۶۴	۱۰۳۰
D	۱/۲۵	۰/۱۵	۱۰	مس	۶۴	۱۰۲۰
E	۱/۲۵	۰/۱۵	۳۰	مس	۶۴	۱۰۲۰
F	۲/۵	۰/۴۵	۳۰	مس	۸۰	۱۰۴۲
H	۰	-	-	پارافین	-	۹۰۰

۲-۲- بررسی تجربی و عددی ریز ساختار ترکیب الیاف فلزی و پارافین

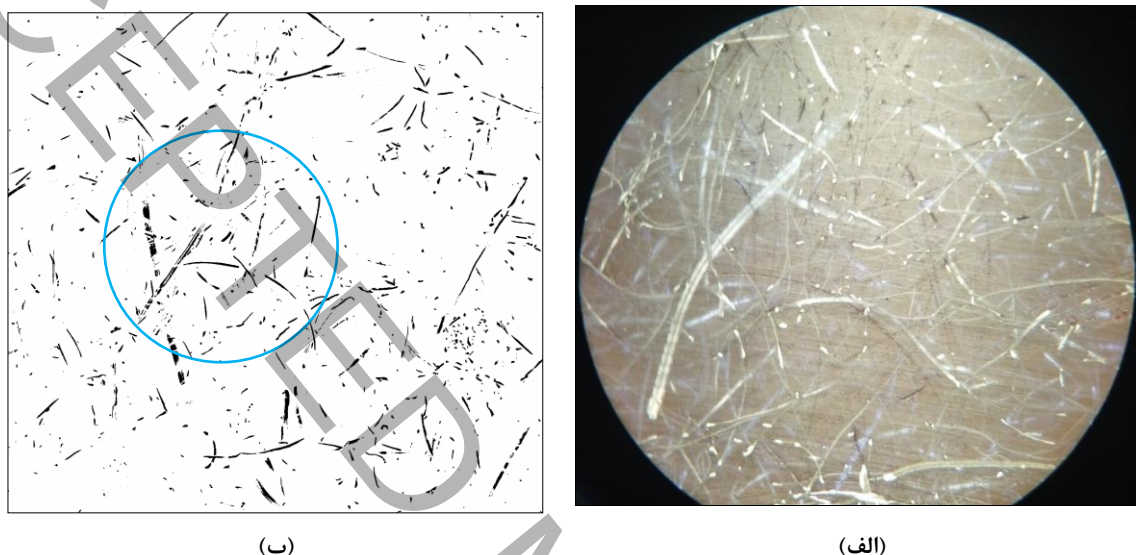
در این پژوهش ریزساختار ترکیب الیاف فلزی و پارافین در حالت‌های مختلف به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. ساختار درهم‌تنیده هزاران رشته‌ی فلزی با جهت‌گیری‌های متفاوت، در نگاه نخست یک فضای هندسی غیر قابل تحلیل به نظر می‌رسد. احتمالاً به همین دلیل محققان بسیاری برای تحلیل آن از ریاضیات فراکتالی بهره برده‌اند [۲۹، ۳۰]. در کار حاضر از زاویه‌ی دیگری به ساختار کامپوزیت‌های فیبری نگاه شده است. این روش تحلیل یک روش نوآورانه است که تاکنون بررسی نشده و به دنبال یک راه‌کار برای تحلیل ساختارهای متخلخل رشته‌ای با ریاضیات متعارف و تعریف پارامترهای قابل اندازه‌گیری جهت تعیین خواص مواد متخلخل است. اگر یک صفحه فرضی دلخواه (S) از یک ترکیب فیبری عبور نماید، روی این صفحه به جای آن ترکیب درهم‌تنیده فقط تعدادی سطوح برش رشته‌های فیبری که دارای مرز مشخص با فاز پیوسته هستند، قابل مشاهده است. اگر رشته‌ها را مانند میله‌های صاف بلند در نظر بگیریم، سطح برخورد آن‌ها روی این صفحه یک بیضی است که ابعاد بیضی معیاری از زاویه‌ی رشته نسبت به صفحه‌ی برشی است. چنانچه این صفحه عمود بر راستای انتقال حرارت باشد، با این روش زاویه‌ی تمامی رشته‌های عبوری از این صفحه نسبت به راستای انتقال حرارت مشخص شده است. در ادامه می‌توان با متوسط‌گیری، زاویه‌ی مؤثر رشته‌ها (θ) را نسبت به راستای انتقال حرارت به دست آورد. سپس در تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر به روش مقاومت‌های سری و موازی از این زاویه استفاده کرد.

برای بررسی تجربی ریزساختار ترکیب، نیاز به برش نمونه‌ها است. به دلیل شکل‌پذیری پارافین، برش نمونه‌های متشکل از الیاف فلزی و پارافین بدون تغییر در ریزساختار عملاً امکان پذیر نیست. از این رو از یک راه‌کار جایگزین برای رفع این چالش استفاده شده است. در این روش، ترکیب رزین و اپوکسی جایگزین فاز پیوسته (پارافین) شده و تمام فضای متخلخل بین رشته‌ها را پر کرده است. اندازه‌ی نمونه‌ها، نحوه‌ی پخش الیاف فلزی، قطر و طول الیاف برای اطمینان از مشابهت با نمونه‌ی اصلی، دقیقاً برابر در نظر گرفته شده است. سپس نمونه‌ها در مقاطع و جهات مختلف برش و صیقل خورده‌اند. در شکل ۴ (الف) بخشی از یک سطح پرداخت شده که با میکروسکوپ نوری عکس برداری شده، قابل مشاهده است. در گام بعدی، از سطح نمونه‌ها عکس برداری شده و در انتها تصاویر با استفاده از نرم افزار ImageJ پردازش شده و فاز پیوسته و پراکنده، زاویه مؤثر و تعداد رشته‌ها مشخص شده‌اند. در شکل ۴ (ب) تصویر پردازش شده سطح تبادل حرارت آمده است.

مفهوم زاویه مؤثر این است که اگر تمامی رشته‌ها (با سطح مقطع a) که هرکدام در یک راستای نامشخص از صفحه‌ی S عبور می‌کنند با زاویه‌ای برابر با زاویه مؤثر از این صفحه عبور نمایند، اثر آن‌ها با حالت اولیه یکسان خواهد بود. با توجه به توضیحات فوق زاویه مؤثر طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$\cos \theta = \frac{n_x \cdot a}{A_x} \quad (3)$$

که در آن n_x و A_x به ترتیب تعداد و سطح تماس رشته‌ها با صفحه S هستند.



شکل ۴. (الف) تصویری میکروسکوپی از ریزساختار ترکیب دوفاز رزین و الیاف فولاد کم کربن (ب) تصویر پردازش شده از سطح تبادل حرارت یک ترکیب متخلخل رشته‌ای با کمک نرم افزار ImageJ

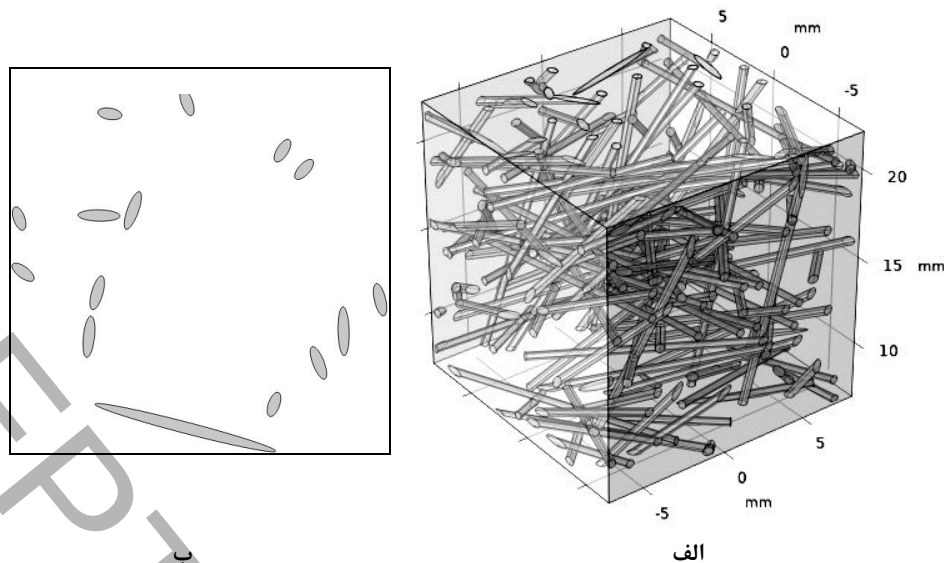
Fig. 4. (a) Microscopic image of the microstructure of a two-phase composite of resin and low-grade carbon steel fibers (b) Processed image of the heat exchange surface of a fibrous composite using ImageJ software

علاوه بر روش تجربی فوق، از یک مدل عددی در محیط نرم افزار کامسول^۱ برای مطالعه نمونه‌های بیشتر استفاده شده است. چون پراکندگی الیاف فلزی ماهیتی تصادفی دارد، امکان ترسیم چنین هندسه پیچیده‌ای که شامل هزاران رشته با راستای متفاوت است، به کمک ماژول‌های نرم افزار کامسول امکان پذیر نیست. بنابراین یک کد عددی برای تعریف تابع پراکندگی و تولید هندسه رشته‌های فلزی تدوین شده است. کد عددی مورد اشاره با زبان برنامه نویسی جاوا^۲ تدوین و در محیط مدل‌سازی^۳ کامسول اجرا شده است. در شکل ۵ یک برش مکعبی به ابعاد ۱۵ میلی‌متر از مدل عددی که به روش فوق ساخته شده، نشان داده شده است. برای ساخت مدل‌های عددی قید عدم تداخل رشته‌ها، راستای تصادفی و محدودیت به مرز استوانه‌ای به ابعاد نمونه‌های تجربی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ دامنه‌ی تغییرات پارامترهایی مانند طول، قطر و درصد حجمی رشته‌های فلزی که بر ساختار ترکیب و ضریب انتقال حرارت مؤثر اثر گذار هستند، آمده است. برای بررسی نقش پارامترهای جدول ۳ تعداد ۸۴ مدل عددی مختلف ساخته و مورد مطالعه قرار گرفتند.

¹ Comsol Multiphysics

² JavaScript

³ Model Builder



شکل ۵. (الف) برشی مکعبی از مدل عددی شامل الیاف فلزی و ماده تغییر فاز دهنده (ب) سطح مقطع الیاف در راستای عمود بر انتقال حرارت
Fig. 5. (a) Cubic section of the numerical model, including metal fibers and phase change material. (b) Cross-section of the fibers in the direction perpendicular to heat transfer

پس از ساخت مدل‌های عددی با پارامترهای مختلف، به کمک امکانات نرم افزار کامسول^۱ یک برش دلخواه عمود بر راستای انتقال حرارت ایجاد می‌گردد و تعداد، سطح مقطع و محیط رشته‌هایی که از صفحه‌ی مذکور عبور می‌کنند، به دست می‌آید. به عنوان مثال؛ شکل ۵ (ب) سطح مقطع الیاف را در راستای عمود بر انتقال حرارت برای نمونه‌ی مکعبی شکل ۵ (الف) نشان می‌دهد. با مشخص شدن پارامترهای فوق امکان تحلیل ریز ساختار و محاسبه‌ی زاویه‌ی مؤثر مطابق معادله (۳) فراهم می‌شود.

جدول ۳ دامنه‌ی تغییرات پارامترهای مؤثر بر ساختار مدل‌های عددی، برای بررسی انتقال حرارت در ترکیب دو فاز الیاف فلزی و پارافین

Table 3. Range of variation for parameters influencing the numerical models for investigating heat transfer in a fibrous composite

عنوان پارامتر	درصد حجمی فاز ناپیوسته	قطر الیاف (میکرون)	طول رشته‌ها (mm)	محدوده تغییرات زاویه رشته‌ها	راستای انتقال حرارت
مقدار	۲/۵ – ۰/۷۵	۱۵۰ ۳۰۰ ۴۵۰	۱۰ ۱۵ ۳۰	۰-۱۵ ۰-۳۰ ۰-۴۵ ۰-۹۰	X,Y,Z

پس از مشخص شدن زاویه مؤثر رشته‌ها، می‌توان ضریب انتقال حرارت مؤثر را با استفاده از روش مقاومت‌های سری و موازی تعیین کرد. در اغلب کارهای انجام شده ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیبات چند فاز با فرض دو ساختار کاملاً مجزا (برای فاز پیوسته و پراکنده) که دارای آرایش سری یا موازی (یا ترکیبی از این دو) نسبت به جریان انتقال حرارت هستند، محاسبه شده است. با توجه به نحوه‌ی توزیع جزء پراکنده درون فاز پیوسته، این تقریب‌ها می‌تواند با خطای قابل توجهی همراه باشد. با بررسی تمام روابط ارائه شده، می‌توان گفت ضریب انتقال حرارت مؤثر یک ترکیب دوفازی در هر حالتی بین دو محدوده‌ی موازی (بیشینه) و سری (کمینه) است [۳۱]. مشهورترین روش‌ها برای تقریب ضریب انتقال حرارت مواد چند فاز شامل مدل پرانتل، مدل ماکسول و یا نظریه‌ی متوسط‌گیری مؤثر^۲ است که روابط آن‌ها در شکل ۶ به صورت خلاصه ارائه شده است.

$$k_{series} \leq k_{eff} \leq k_{parallel} \quad (4)$$

^۱قابلیت cross section در نرم افزار کامسول برای ایجاد یک مقطع دو بعدی از یک مدل سه بعدی است. سطح برش می‌تواند در راستای صفحات XY, YZ, ZX یا یک صفحه‌ی دلخواه باشد.

^۲ Effective Medium Theory (EMT)

در بیشتر مطالعات تجربی و تحلیلی که برای تعیین خواص مواد دوفازی انجام شده است، تخلخل را به صورت یک پارامتر ثابت که حاصل نسبت حجم فاز پیوسته به حجم کل است، در نظر گرفته‌اند. اما داده‌های تجربی و بررسی ریزساختار ترکیب مورد مطالعه نشان داد که با توجه به ساختار تصادفی مواد متخلخل، چنین فرضی باعث می‌شود نتایج با حدی از خطا همراه باشد. از این رو ثابت فرض کردن تخلخل به ویژه در نمونه‌هایی که نسبت طول رشته‌ها در مقایسه با ضخامت دیواره انتقال حرارت عدد قابل توجهی باشد، موجب خطای زیادی می‌شود.

مدل پراتل		$k = \varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2$
مدل ماکسول		$k = \frac{k_1 \varphi_1 + k_2 \varphi_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}}{\varphi_1 + \varphi_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}}$
روش EMT		$\varphi_1 \frac{k_1 - k}{k_1 + 2k} + \varphi_2 \frac{k_2 - k}{k_2 + 2k} = 0$
مدل ماکسول		$k = \frac{k_2 \varphi_2 + k_1 \varphi_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}{\varphi_2 + \varphi_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}$
مدل مقاومت‌های موازی		$k = \frac{1}{\varphi_1/k_1 + \varphi_2/k_2}$

شکل ۶. پنج مدل مشهور برای تقریب ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیبات دوفازی [۳۱]

Fig. 6. Five fundamental effective thermal conductivity structural models for two-component materials [31]

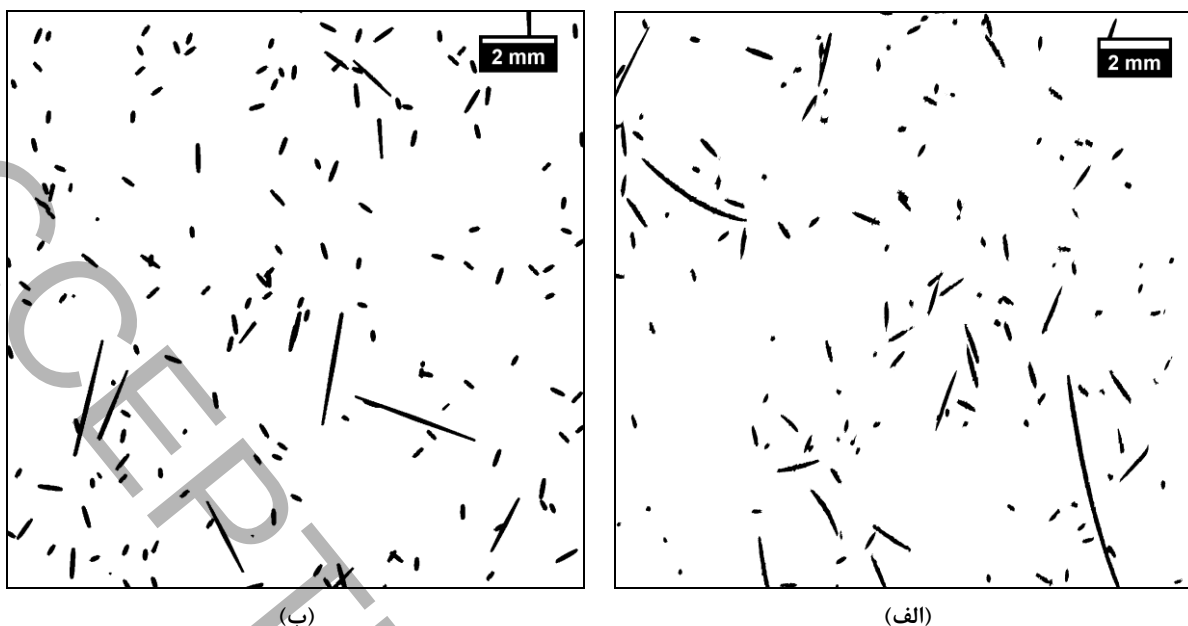
در این پژوهش ابتدا ریزساختار ترکیب دوفازی مطالعه شده است و به روشی که پیشتر شرح داده شد، زاویه مؤثر الیاف فلزی مشخص گردیده است. در گام بعدی، درصد حجمی موضعی الیاف از معادله (۵) و ضریب انتقال حرارت مؤثر روی سطح تبادل حرارت از معادله (۶) بدست می‌آید.

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon}{\cos \theta} \left(\frac{L}{l} \right) \left(\frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

$$k_{eff}(x) = \cos^2 \theta (k_{parallel} - k_{series}) + k_{series} \quad (6)$$

که در روابط بالا ε درصد حجمی کل الیاف فلزی، θ زاویه مؤثر رشته‌ها روی یک صفحه‌ی عمود بر انتقال حرارت، L بُعد طول دیواره، l طول رشته‌های فلزی، n تعداد رشته‌ها در نقطه‌ی x و N تعداد کل رشته‌ها در جسم است. در بخش نتایج به کمک داده‌های تجربی و عددی صحت روابط فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۷ (الف) و (ب) تصویری پردازش شده با نرم‌افزار ImageJ از یک سطح برش خورده‌ی کامپوزیت فیبری، با یک برش از مدل عددی ساخته شده از همان نمونه مقایسه شده است. همان‌گونه که از شکل ۷ پیداست؛ نتایج داده‌های عددی با نمونه‌های تجربی سازگاری خوبی دارد. تحلیل هر دو تصویر به کمک نرم‌افزار ImageJ نشان داد که سطح مقطع رشته‌ها نسبت به سطح کل برابر با ۳ درصد است و تعداد رشته‌ها نیز با خطای کمتر از ۱۰ درصد با هم برابر است.



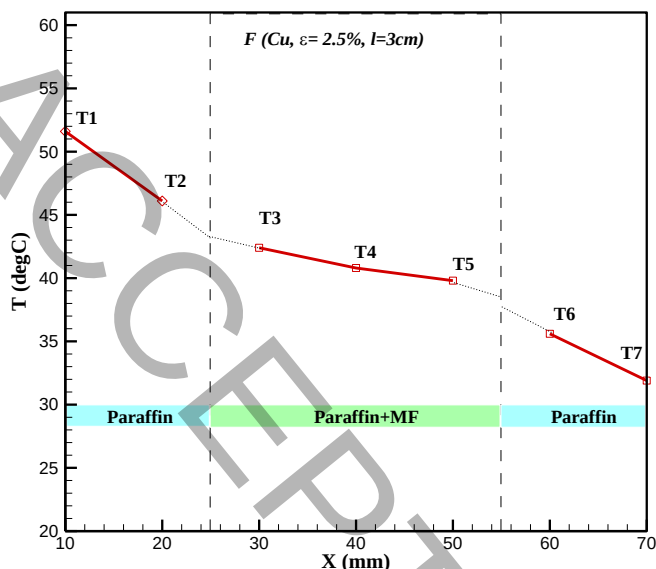
شکل ۷. (الف) یک تصویر پردازش شده از سطح مقطع ترکیب الیاف مسی و رزین با استفاده از نرم افزار imageJ (ب) یک برش از مدل عددی تهیه شده با نرم افزار کامسول

Fig. 7. (a) A processed image of the cross-sectional of the copper fiber/resin composite using imagej software (b) a section of the numerical model prepared with COMSOL Software

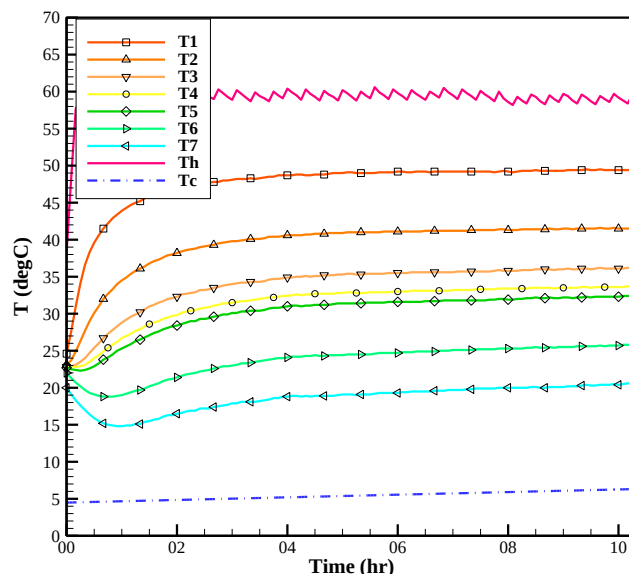
۳- نتایج و بحث

در شکل ۸ (الف) نمودار تغییرات دما نسبت به زمان برای نمونه‌ی F که بین دو منبع حرارتی با دمای ثابت ۶۰ و ۵ درجه قرار دارد، نشان داده شده است. با توجه به شکل، شرایط پایدار دمایی پس از گذشت ۶ ساعت محقق شده است. دمای T_1 تا T_7 دمای نقاط مشخص شده در شکل ۲ را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۸ (ب) نیز پیداست، در قسمت میانی استوانه که ترکیبی از الیاف مسی و ماده تغییر فاز دهنده است، شیب تغییرات دما بسیار کمتر از قسمت ابتدایی و انتهایی آن است. پس از تحقق شرایط پایدار، با جای‌گذاری دماهای فوق در معادله (۲) ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب الیاف فلزی و پارافین محاسبه می‌شود. تمامی نمودارها در این مقاله، توزیع دما در شرایط پایدار را ارائه می‌کند و ضریب انتقال حرارت مؤثر نیز مطابق استاندارد E1225-4 اندازه‌گیری می‌شود. نتایج تجربی نشان داد که ضریب انتقال حرارت مؤثر نمونه‌ی F، 0.74 وات تقسیم بر متر درکلین است که نسبت به پارافین خالص افزایش ۲۵۳ درصدی را نشان می‌دهد.

برای بررسی تأثیر جنس الیاف فلزی بر ضریب انتقال حرارت مؤثر ماده تغییر فاز دهنده از دو فلز مس و فولاد کم‌کربن استفاده شده است. شکل ۹ دمای حالت پایدار نمونه‌های ساخته شده از الیاف استیل کم‌کربن (A) و الیاف مسی (D) که هر دو دارای طول رشته‌های یکسان و تخلخل برابر هستند را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج رشته‌های مسی ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب را بیش از الیاف استیل کم‌کربن بهبود می‌بخشند. این الیاف موجب بهبود ۱۳۱ درصدی ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده می‌شوند (معادل 0.48 وات تقسیم بر متر درکلین) در حالی که الیاف استیل کم‌کربن ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب را تنها ۴۷ درصد (معادل 0.31 وات تقسیم بر متر درکلین) ارتقاء می‌دهند. طبق معادله (۴) چون ضریب انتقال حرارت مس حدود ده برابر استیل است با فرض تخلخل یکسان، ضریب انتقال حرارت بیشینه $k_{parallel}$ به شکل محسوسی افزایش می‌یابد و همین موضوع موجب بهبود ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب می‌شود.

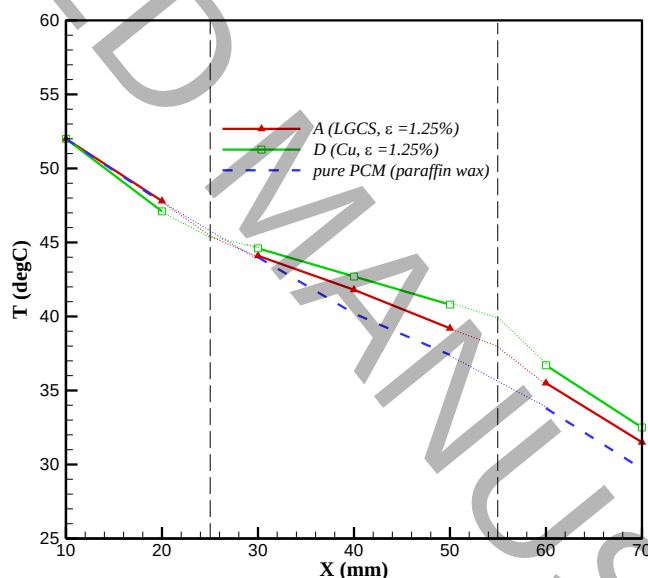


(ب)



(الف)

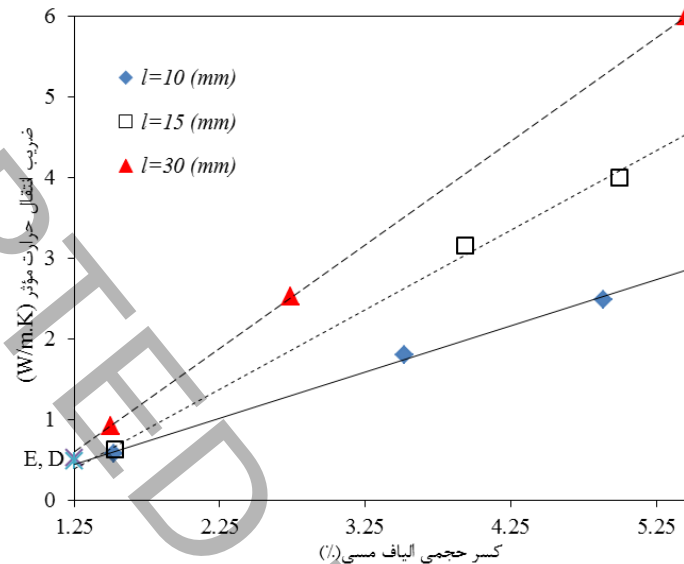
شکل ۸. (الف) تغییرات دمای وابسته به زمان (ب) توزیع دمای پایدار نمونه‌ی F
Fig. 8. (a) Time-dependent, (b) steady-state temperature distribution of case F



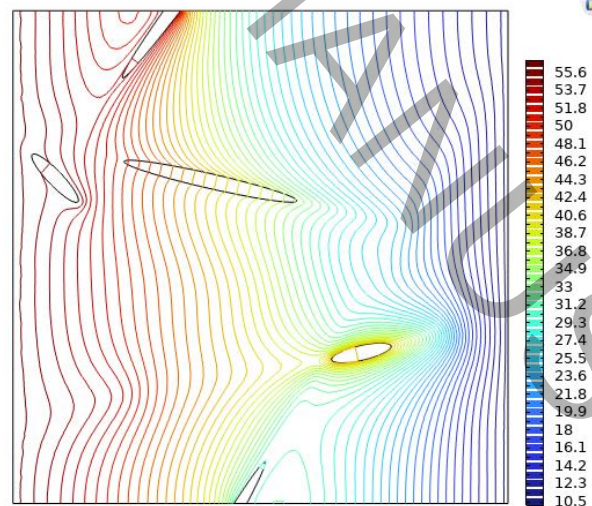
شکل ۹. مقایسه توزیع دمای پایدار در نمونه‌های A (الیاف استیل)، D (الیاف مسی) و پارافین خالص تحت شرایط یکسان
Fig. 9. Comparison of steady-state temperature distribution in cases A (steel fibers), d (copper fibers), and pure paraffin under identical conditions

طول الیاف فلزی از دیگر مشخصه‌هایی است که می‌تواند ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دوفازی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین علاوه بر بررسی تجربی دو نمونه E و D که دارای درصد تخلخل، قطر و آرایش یکسان اما طول متفاوت هستند از داده‌های عددی نیز برای بررسی دقیق‌تر موضوع استفاده شده است. در شکل ۱۰ نتایج حل عددی برای ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دوفاز رشته‌های مسی و پارافین برای نمونه‌هایی با قطر الیاف ۱۵۰ میکرومتر و طول رشته‌های متفاوت گزارش شده است. طبق نمودار با افزایش طول و کسر حجمی الیاف فلزی ضریب انتقال حرارت به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ ضریب انتقال حرارت مؤثر برای نمونه‌های E و D که به روش استاندارد اندازه‌گیری شده است نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج تجربی دقیقاً بر روی

خط روند داده‌های عددی قرار دارند. این موضوع تطابق بالای نتایج عددی و تجربی را نشان می‌دهد. ضریب انتقال حرارت برای نمونه‌ی E برابر با ۰/۵۱ وات درکلین اندازه‌گیری شد که به نسبت نمونه‌ی D افزایش ۶ درصدی را نشان می‌دهد. برای درک بهتر نقش طول الیاف فلزی، شکل ۱۱ توزیع دمای پایدار یک مدل عددی از ترکیب دوفاز رشته‌های مسی و پارافین را نشان می‌دهد. در مجاورت الیاف فلزی فاصله خطوط هم‌دما کم‌تر شده که گویای افزایش ضریب انتقال حرارت در مجاورت الیاف فلزی است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت؛ هرچه طول الیاف فلزی در راستای انتقال حرارت بیشتر باشد، این الیاف نقش بیشتری در انتقال حرارت خواهند داشت. با توجه به نتایج فوق، افزایش طول رشته‌ها موجب بهبود ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب می‌شوند.



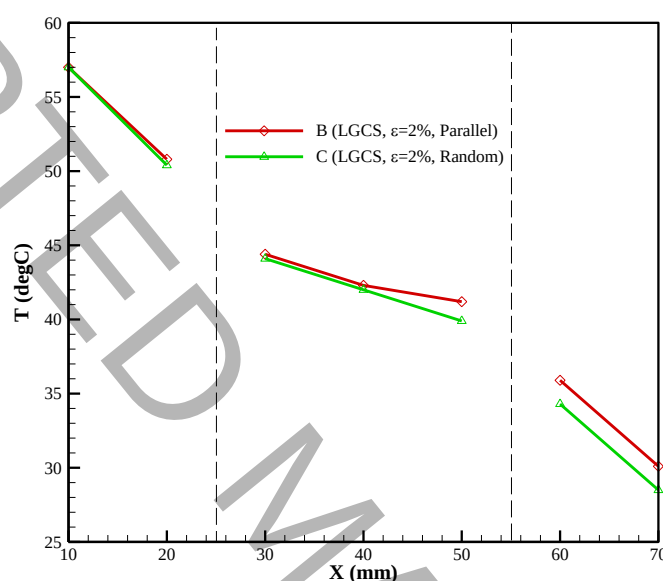
شکل ۱۰. تأثیر طول و کسر حجمی الیاف مسی بر ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دوفاز الیاف فلزی و پارافین ($d=0.15$ mm)
Fig. 10. Effects of copper fiber length and volume fraction on the effective thermal conductivity of the fibrous composite ($d=0.15$ mm)



شکل ۱۱. توزیع دمای پایدار یک ترکیب دوفاز پارافین - الیاف فلزی در حالت جامد
Fig. 11. Steady-state temperature distribution of a fibrous composite in the solid state

در نمودار شکل ۱۰ تأثیر کسر حجمی الیاف فلزی نیز نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود؛ با افزایش کسر حجمی الیاف فلزی، ضریب انتقال حرارت مؤثر به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. این موضوع در پژوهش‌های بسیاری نیز گزارش شده است. طبق معادله (۶) با توجه به تفاوت بسیار زیاد ضرایب انتقال حرارت مس و پارافین بدیهی است که با افزایش کسر حجمی الیاف فلزی، ضریب انتقال حرارت مؤثر نیز افزایش می‌یابد و نتایج عددی و تجربی در این پژوهش نیز مؤید آن است.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد؛ زاویه‌ی الیاف نسبت به راستای انتقال گرما، بر ضریب انتقال حرارت کلی مواد دوفاز فیبری بسیار تأثیر گذار است. بر همین اساس دو نمونه تجربی حاوی الیاف استیل کم‌کربن و پارافین با مشخصات کاملاً یکسان (از نظر کسر حجمی الیاف، طول و قطر رشته‌ها) اما با آرایش متفاوت ساخته و بررسی شدند. در نمونه‌ی B رشته‌های استیل کم‌کربن در راستای انتقال گرما قرار داده شدند در حالی که در نمونه‌ی C الیاف بدون نظم خاصی به ترکیب اضافه شدند. نتایج نشان داد که آرایش الیاف پس از درصد تخلخل، قوی‌ترین عامل در تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر است. شکل ۱۲ توزیع دمای حالت پایدار نمونه‌های یاد شده را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و با توجه به معادله (۲) ضریب انتقال حرارت مؤثر برای نمونه‌ی B و C به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۳۵ وات تقسیم بر متر درکلون بدست می‌آید که حاکی از افزایش بهبود ۱۴۸ درصدی ضریب انتقال حرارت مؤثر نمونه‌ی B نسبت به نمونه‌ی C است. در همین راستا باید اشاره کرد که ضریب انتقال حرارت مؤثر نمونه‌ی B نسبت به پارافین خالص ۴ برابر افزایش داشته است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی توزیع دمای پایدار نمونه‌های تقویت شده با الیاف فولاد کم‌کربن با مشخصات فیزیکی یکسان و آرایش متفاوت (B, C)

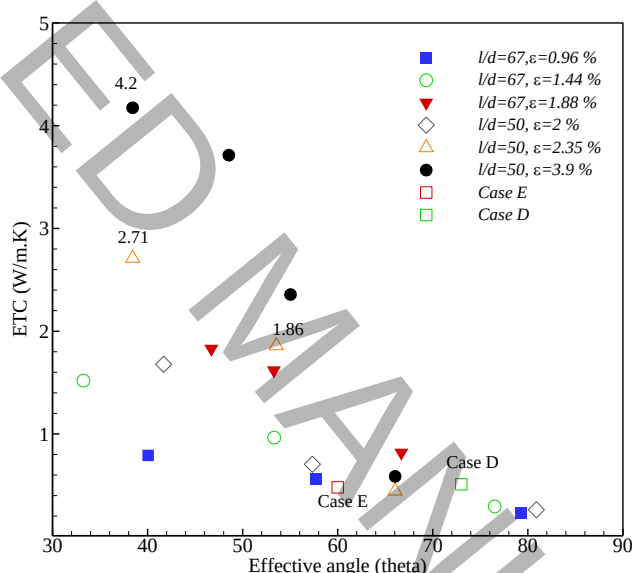
Fig. 12. Effect of metal fibers orientation on steady-state temperature distribution (Cases B and C)

نتایج داده‌های تجربی با معادله (۴) نیز انطباق خوبی دارد. با توجه به جدول ۱ کسر حجمی الیاف فلزی در نمونه‌های یاد شده ۲ درصد است. از طرفی حد بالای ضریب انتقال حرارت مؤثر (تقریب پرائتل) برای ترکیب دوفاز الیاف استیل-پارافین با مشخصات ذکر شده، برابر با ۱ وات تقسیم بر متر در کلون است. ملاحظه می‌شود که ضریب انتقال حرارت نمونه‌ی B با خطای ۱۳ درصد با داده‌های تئوری انطباق دارد. این نتایج، دقت در ساخت مجموعه‌ی آزمایشی و اندازه‌گیری‌های تجربی را نشان می‌دهد. به دلیل محدودیت‌های ساخت نمونه‌های تجربی، برای بررسی بیشتر نقش راستای الیاف فلزی ۲۰ مدل عددی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۱۳ آمده است. با توجه به شکل ۱۳ با افزایش زاویه مؤثر الیاف فلزی نسبت به راستای انتقال حرارت (θ)، ضریب انتقال حرارت مؤثر به شکل محسوسی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال؛ در شکل ۱۳ ضریب انتقال حرارت مؤثر برای ترکیبی از پارافین و الیاف مسی با کسر حجمی ۲/۳۵ درصد و قطر ۳۰۰ میکرون نشان داده شده است. هنگامی که زاویه‌ی رشته‌ها با راستای انتقال حرارت ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، ضریب انتقال حرارت مؤثر ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. لازم به‌ذکر است زاویه‌ی مؤثر مدل‌های عددی به روش شرح داده شده در بخش ۲-۲ و با استفاده از معادله (۳) محاسبه شده است.

در مورد شکل ۱۳ باید افزود، کسر حجمی الیاف فلزی یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دو فازی پارافین و الیاف فلزی است. همان‌گونه که از شکل پیداست، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۲/۳۵ درصد تا ۳/۹ درصد ضریب انتقال حرارت مؤثر از ۲/۷۱ تا ۴/۲ وات تقسیم بر متر در کلون افزایش خواهد یافت. این در حالی است که اگر زاویه مؤثر رشته‌ها نسبت به راستای انتقال حرارت از ۴۰ درجه تا ۶۶ درجه افزایش یابد، ضریب انتقال حرارت مؤثر هر دو مدل به کمتر از ۰/۶ وات تقسیم بر متر

در کلون سقوط خواهد کرد. از این رو می توان گفت دو عامل کلیدی در تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیبات دو فازی رشته ای تخلخل و راستای قرارگیری رشته هاست.

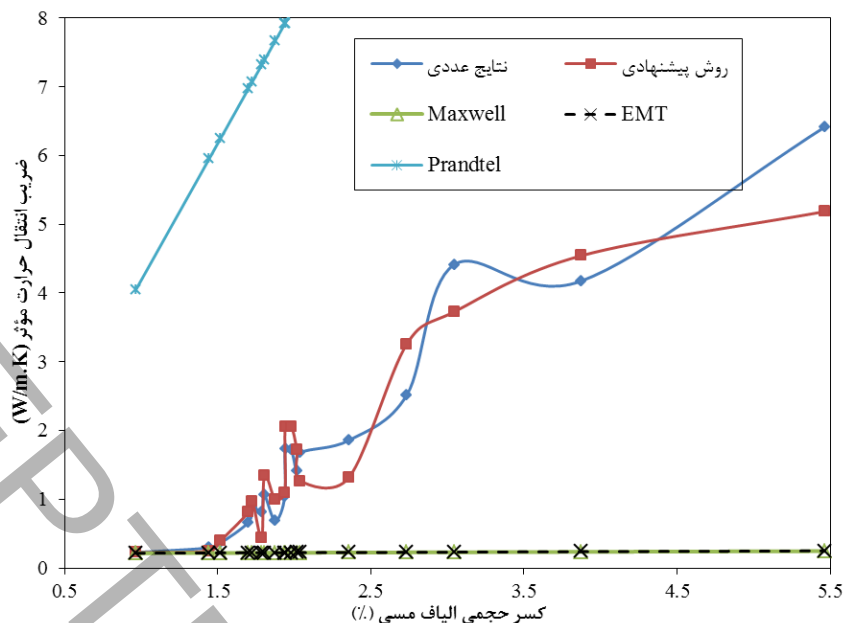
تمامی نتایج تجربی و عددی ارائه شده در بخش های قبلی به خوبی در معادله (۶) منعکس شده است. در این رابطه کسر حجمی الیاف و زاویه ی مؤثر آن ها با راستای انتقال حرارت، نقش بسیار پررنگی در تعیین ضریب انتقال حرارت ماده دوفازی دارد. لازم بذکر است نقش سایر پارامترها مانند قطر الیاف نیز به واسطه ی حضور پارامتر زاویه ی مؤثر در معادله (۶) دیده شده است. همان گونه که در بخش قبلی نیز بیان شد؛ در کار حاضر یک راه تجربی و یک روش عددی برای تعیین زاویه مؤثر ترکیبات متخلخل با ساختار رشته ای ارائه شده است. سپس با استفاده از پارامترهای زاویه مؤثر و کسر حجمی الیاف فلزی، یک روش تحلیلی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت مؤثر مواد دوفاز فیبری ارائه شده است. در شکل ۱۴ نتایج داده های عددی با معادله (۶) و سایر مدل های شناخته شده مقایسه شده است. همان گونه که پیداست سایر روش ها به دلیل این که اثر ریز ساختار ترکیبات دوفازی را در نظر نمی گیرند، دقیق نیستند. این درحالی است که در فرمول پیشنهادی کار حاضر با تحلیل ریزساختار ترکیب دوفاز فیبری و استفاده از مفهوم زاویه ی مؤثر رشته ها، رابطه ای دقیق برای تقریب ضریب انتقال حرارت مؤثر ارائه شده است.



شکل ۱۳. بررسی عددی تغییر ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دو فازی الیاف مسی-پارافین با تغییرات زاویه مؤثر و کسر حجمی الیاف

Fig. 13. Numerical investigation of the effective thermal conductivity in a copper fibrous composite with variations in effective angle and fibers volume fraction

در سایر کارهای مشابه نیز از مفهوم زاویه مؤثر استفاده شده و طبق قواعد مقاومت های سری و موازی فرمولی مشابه معادله (۶) ارائه شده است [۳۲]. اما در کارهای قبلی روشی برای محاسبه و تحلیل زاویه مؤثر الیاف ارائه نشده بود و در کار حاضر یک روش نوآورانه برای آن ارائه شد.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی نتایج حل عددی با فرمول پیشنهادی و سایر مدل‌های تحلیلی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب دوفازی
Fig. 14. Comparison of numerical results with the proposed equation and other analytical models for estimating the effective thermal conductivity coefficient of a fibrous composite

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیب الیاف فلزی و پارافین با استفاده از روش حرارت سنجی مقایسه‌ای طبق استاندارد E1225-4 در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. تأثیر پارامترهای مختلفی مانند طول، جنس، تخلخل و آرایش رشته‌ها به صورت تجربی و عددی بررسی شد. مدلی عددی با کد نویسی به زبان جاوا تهیه و در محیط نرم افزار کامسول مورد تحلیل قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد فقط با افزودن دو درصد حجمی الیاف فلزی به یک ماده تغییر فاز دهنده، می‌توان ضریب انتقال حرارت مؤثر را تا ۴ برابر افزایش داد. طبق نتایج تجربی؛ هنگامی که از الیاف مسی بجای الیاف استیل استفاده شود ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده ۵۵ درصد بهبود می‌یابد. در این پژوهش برای تحلیل ساختارهای دو فاز فیبری که دارای آرایش نامنظمی هستند، یک پارامتر قابل اندازه‌گیری با عنوان زاویه مؤثر رشته‌ها تعریف و روش‌های محاسبه‌ی آن به صورت تجربی و عددی شرح داده شد. علاوه بر آن یک رابطه تحلیلی برای تعیین ضریب انتقال حرارت مؤثر ترکیبات دوفاز فیبری پیشنهاد و نتایج آن با داده‌های عددی و سایر مدل‌های شناخته شده، مقایسه گردید. نتایج عددی و تجربی نشان داد، تأثیر جنس، جهت گیری و درصد حجمی الیاف بیش از سایر پارامترها است. به‌طوری‌که با افزایش کسر حجمی الیاف از ۲/۳۵ تا ۳/۹ درصد ضریب انتقال حرارت مؤثر بیش از ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت و هنگامی که زاویه‌ی مؤثر الیاف با راستای انتقال حرارت ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، ضریب انتقال حرارت مؤثر ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت استفاده از الیاف فلزی برای تقویت خواص حرارتی مواد تغییر فاز دهنده یک روش ارزان و بسیار کارآمد است

Experimental and Numerical Investigation of the Effects of Metal Fibers on Heat Conduction in Phase Change Materials

Mohammad Jowzi ¹, Jafar Jamaati ^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Iran
Email address:
j.jamaati@razi.ac.ir

ABSTRACT

Several methods have been proposed to enhance the thermal conductivity coefficient of phase change materials. In this study, the effect of incorporating metallic fibers on the enhancement of thermal conductivity in PCMs is investigated through both experimental and numerical approaches. The impact of fiber material, diameter, length, and volume fraction on the conductive heat transfer performance of PCMs has been investigated. Experimental results demonstrate that the addition of a small volume fraction of metallic fibers (approximately 2%) can improve the thermal conductivity of PCMs by up to four times. In two identical experimental setups, replacing steel fibers with copper fibers resulted in a 55% increase in thermal conductivity. The numerical results indicate that increasing the volume fraction of fibers from 2.35% to 3.9% leads to an improvement of more than 50% in the effective thermal conductivity. On the other hand, increasing the orientation angle of the fibers by 15 degrees relative to the direction of heat flow results in a 31% decrease in thermal conductivity. This study also presents a novel approach for evaluating the microstructure of fibrous composites and determining their effective thermal conductivity.

Keywords: Energy Storage, Phase Change Material, Metal Fibers, Effective Thermal Conductivity, Anisotropic Materials

فهرست علائم:

علائم انگلیسی

A_x	سطح مقطع کل رشته‌های فلزی در تماس با صفحه‌ی عمود بر راستای انتقال حرارت	L	طول (بعد) دیواره‌ی انتقال حرارت
a	سطح مقطع یک رشته فلزی	l	طول رشته‌های فلزی
k_e	ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر	x	فاصله بین ترموکوپل‌ها/مختصات طولی در راستای انتقال حرارت
k_m	ضریب انتقال حرارت هدایت رشته‌های فلزی	علائم یونانی	
k_{pcm}	ضریب انتقال حرارت هدایت ماده‌ی تغییر فاز دهنده	ε	کسر حجمی الیاف فلزی (%)
k_{max}	ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر یک ترکیب دو فازی در حالت بیشینه	θ	زاویه مؤثر الیاف فلزی به راستای انتقال حرارت
k_{min}	ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر یک ترکیب دو فازی در حالت کمینه	ϕ	ضریب تخلخل (%)

- [1] P. IEA, World energy outlook 2022, Paris, France: International Energy Agency (IEA), (2022).
- [2] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, A.P. Roskilly, Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*, 283 (2021) 116277.
- [3] M. Alizadeh, M.H. Shahavi, D.D. Ganji, Performance enhancement of nano PCM solidification in a hexagonal storage unit with innovative fin shapes dealing with time-dependent boundary conditions, *Energy Reports*, 8 (2022) 8200-8214.
- [4] A. Reyes, L. Henríquez-Vargas, J. Rivera, F. Sepúlveda, Theoretical and experimental study of aluminum foils and paraffin wax mixtures as thermal energy storage material, *Renewable Energy*, 101 (2017) 225-235.
- [5] A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, Y. Sulaiman, A. Mohammad, Heat transfer enhancement for PCM thermal energy storage in triplex tube heat exchanger, *Heat Transfer Engineering*, 37(7-8) (2016) 705-712.
- [6] C. Zhang, Y. Fan, M. Yu, X. Zhang, Y. Zhao, Performance evaluation and analysis of a vertical heat pipe latent thermal energy storage system with fins-copper foam combination, *Applied Thermal Engineering*, 165 (2020) 114541.
- [7] V. Safari, B. Kamkari, N. Hewitt, K. Hooman, Experimental comparative study on thermal performance of latent heat storage tanks with pin, perforated, and rectangular fins at different orientations, *Thermal Science and Engineering Progress*, 48 (2024) 102401.
- [8] H. Masoumi, S. Mirfendereski, Experimental and numerical investigation of melting/solidification of nano-enhanced phase change materials in shell & tube thermal energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, 47 (2022) 103561.
- [9] L. Colla, L. Fedele, S. Mancin, L. Danza, O. Manca, Nano-PCMs for enhanced energy storage and passive cooling applications, *Applied Thermal Engineering*, 110 (2017) 584-589.
- [10] M. Amin, N. Putra, E.A. Kosasih, E. Prawiro, R.A. Lunto, T. Mahlia, Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications, *Applied Thermal Engineering*, 112 (2017) 273-280.
- [11] K. Cui, L. Liu, F. Ma, M. Jing, Z. Li, Y. Tong, M. Sun, S. Li, J. Zhang, Y. Zhang, Enhancement of thermal conductivity of Ba (OH) 2· 8H2O phase change material by graphene nanoplatelets, *Materials Research Express*, 5(6) (2018) 065522.

- [12] W. Su, J. Darkwa, G. Kokogiannakis, Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies, *Renewable and sustainable energy reviews*, 48 (2015) 373-391.
- [13] Y. Lee, S. Hong, J. Chung, Effects of capsule conduction and capsule outside convection on the thermal storage performance of encapsulated thermal storage tanks, *Solar Energy*, 110 (2014) 56-63.
- [14] C.R. Abujas, A. Jové, C. Prieto, M. Gallas, L.F. Cabeza, Performance comparison of a group of thermal conductivity enhancement methodology in phase change material for thermal storage application, *Renewable energy*, 97 (2016) 434-443.
- [15] Y. Zhuang, Z. Liu, W. Xu, Effects of gradient porous metal foam on the melting performance and energy storage of composite phase change materials subjected to an internal heater: a numerical study and PIV experimental validation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183 (2022) 122081.
- [16] A. Khorram-Nejad, M. Passandideh-Fard, M. Sardarabadi, The influence of porous media on the melting ability of phase change materials used in a heatsink: An experimental investigation, *Journal of Energy Storage*, 98 (2024) 112935.
- [17] A.R. Karimi, M. Siavashi, M. Tahmasbi, A.M. Norouzi, Experimental analysis to improve charge/discharge of thermal energy storage in phase change materials using helical coil and porous metal foam, *Journal of Energy Storage*, 55 (2022) 105759.
- [18] A. NematpourKeshteli, M. Iasiello, G. Langella, N. Bianco, Using metal foam and nanoparticle additives with different fin shapes for PCM-based thermal storage in flat plate solar collectors, *Thermal Science and Engineering Progress*, 52 (2024) 102690.
- [19] J. Chen, D. Yang, J. Jiang, A. Ma, D. Song, Research progress of phase change materials (PCMs) embedded with metal foam (a review), *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 389-394.
- [20] J. Gasia, J.M. Maldonado, F. Galati, M. De Simone, L.F. Cabeza, Experimental evaluation of the use of fins and metal wool as heat transfer enhancement techniques in a latent heat thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, 184 (2019) 530-538.
- [21] C. Prieto, C. Rubio, L.F. Cabeza, New phase change material storage concept including metal wool as heat transfer enhancement method for solar heat use in industry, *Journal of Energy Storage*, 33 (2021) 101926.
- [22] W. Li, Z. Qu, Experimental study of effective thermal conductivity of stainless steel fiber felt, *Applied Thermal Engineering*, 86 (2015) 119-126.
- [23] W. Li, Z. Qu, B. Zhang, K. Zhao, W. Tao, Thermal behavior of porous stainless-steel fiber felt saturated with phase change material, *Energy*, 55 (2013) 846-852.
- [24] O. Khliyeva, V. Zhelezny, A. Paskal, Y. Hlek, D. Ivchenko, The effect of metal wool on the charging and discharging rate of the phase transition thermal storage material, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5) (2021) 112.
- [25] M. Jowzi, J. Jamaati, Experimental Study of the Effect of Adding Metal Fibers (With Different Lengths, Diameters, Materials, and Porosity) On Improving the Thermal Conductivity of Phase Change Materials, *The Second International Conference on Computer, Electrical, Mechanical and Engineering Sciences*, 2025. (in Persian).
- [26] E.G. Zaki, A. Dhmees, *Paraffin: Thermal Energy Storage Applications*, BoD-Books on Demand, 2022.
- [27] D.W. Hahn, M.N. Özisik, *Heat conduction*, John Wiley & Sons, 2012.
- [28] E. Committee, *Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*.
- [29] H. Shen, Q. Ye, G. Meng, Anisotropic fractal model for the effective thermal conductivity of random metal fiber porous media with high porosity, *Physics Letters A*, 381(37) (2017) 3193-3196.
- [30] C. Zhan, W. Cui, L. Li, A fractal model of effective thermal conductivity of porous materials considering tortuosity, *Energies*, 16(1) (2022) 271.

[31] J. Wang, J.K. Carson, M.F. North, D.J. Cleland, A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials, *International journal of heat and mass transfer*, 49(17-18) (2006) 3075-3083.

[32] S.R. Jagjiwanram, R. Singh, Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems, *Applied Thermal Engineering*, 24(17) (2004) 2727-2736.