

Numerical Study of the Effect of Multiple Phase Change Materials on Improving the Performance of a Thermal Storage System in the Presence of a Middle Plate

Aghil Iranmanesh^{1,*}, Ali Ghorbani², Hadi Farzan³

¹Department of Mechanical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran, iranmanesh.aghil@ujiroft.ac.ir

²Department of Mechanical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran, m.alighorbani1999@gmail.com

³Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran,
hadi.farzan@gmail.com

Keywords:

convection heat transfer, thermal energy storage, middle plate, multiple phase change material, melting process

Abstract:

In the present study, the numerical simulation of the melting process of a vertical triple-tube heat exchanger in the presence of multiple phase change materials and a middle plate is studied. The numerical simulation was modeled in ANSYS Fluent software, using the enthalpy-porosity method. The temperature of the hot fluid passing through the heat exchanger was assumed to be 50 °C while the initial temperature of the heat exchanger was set to 15 °C. The hot fluid passing through the heat storage system flow through the inner and outer tubes in a counter-current manner. The flow regime was supposed to be laminar. To assess the effect of multiple phase change materials and the middle plate on improving the thermal efficiency of the energy storage system, the contours of liquid fraction and PCM temperature were compared in different cases. According to the reported numerical results, the simultaneous use of multiple phase change materials (phase change material with lower melting temperature in the inner chamber and phase change materials with higher melting temperature in the outer chamber) as well as the upper, the lower, and the middle plates increased the thermal energy stored in the heat exchanger by 158.41%.

Original Research Article

Paper History:

Received: 2026/06/3

Revise: 2026/07/27

Accepted: 2026/07/28

How to cite this article: A, Iranmanesh. A, Ghorbani. H, Farzan. "Numerical Study of the Effect of Multiple Phase Change Materials on Improving the Performance of a Thermal Storage System in the Presence of a Middle Plate". Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 4, PP. 19- 36, 2026. <https://doi.org/10.22052/EEM.2026.258903.1180>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction: The present study aims to evaluate the effect of the middle plate on improving the melting process of a vertical triple-tube heat exchanger in the presence of multiple phase change material and a middle plate. To evaluate the efficacy of the middle plate and multiple phase change material on boosting the thermal performance of the heat storage unit, the liquid fraction and PCM temperature contours of various scenarios are compared at miscellaneous times. Furthermore, 12 cases are defined in the current study to assess the effects of the middle plate as well as the multiple phase change material exclusively. More details on the various scenarios studied in the current research are presented in Table 1.

Table 1. Various scenarios studied in the current research.

		Inner chamber	Outer chamber
Case 1	Case 1-1	RT-26	RT-26
	Case 1-2	RT-35	RT-35
	Case 1-3	RT-26	RT-35
	Case 1-4	RT-35	RT-26
Case 2	Case 2-1	RT-26	RT-26
	Case 2-2	RT-35	RT-35
	Case 2-3	RT-26	RT-35
	Case 2-4	RT-35	RT-26
Case 3	Case 3-1	RT-26	RT-26
	Case 3-2	RT-35	RT-35
	Case 3-3	RT-26	RT-35
	Case 3-4	RT-35	RT-26

Materials and Methods

In the present study, the enthalpy-porosity methodology is used as the basis for the numerical analysis of the PCM phase change process. In order to simplify the modeling of the melting mechanism in the thermal energy storage unit, following assumptions have been taken into account:

- The fluid in the liquid phase is assumed to be Newtonian and incompressible.
- The flow regime is assumed to be laminar.
- It is assumed that thermal equilibrium is existed between phases.
- The PCM Volumetric changes during phase change process are ignored in the current study.

- Viscosity losses are supposed to be negligible in the present study.

Research Results

In this section, the impacts of using multiple PCM—in addition to the middle plate—on improving the melting process of a triple-tube thermal storage system was investigated numerically. For this purpose, the liquid fraction and temperature contours for various scenarios studied were comprehensively compared. According to these contours, in case 1 which was the heat exchanger configuration in the absence of the top, bottom, and middle plates, only did the natural convection effect cause the PCM to be melted in the chamber. In all scenarios considered as cases 1, the bottom areas of the heat exchange unit were not affected by the natural convection effect and, thus, these areas melted later than the other regions. Since RT-35 melting temperature was higher than that of RT-26, some of PCM remained solid in the inner or outer chamber of the heat storage unit at the end of the melting phenomenon ($t=8700s$). Furthermore, adding plates at the top and the bottom of the heat exchanger improves the phase change process in all cases. In case 2-2, where the phase change material was the same in both inner and outer chambers, a large amount of the PCM remained solid at 5,400s due to the lower heat transfer area compared to that of the outer chamber. As in case 1, using multiple PCM (case 2-3) made the phase change process more balanced in the inner and outer chambers of the heat exchange unit and ultimately improved the phase change process. In all scenarios in cases 2, the PCM in the middle areas and away from the upper and lower heat transfer surfaces experienced the lowest temperatures. According to liquid fraction and temperature contours in case 3, adding a middle plate in addition to the top and the bottom plates boosted the melting process in all the studied cases considerably. At 5,400 s, all temperature contours in case 3 reached a steady state condition, while none of temperature contours in case 2 experienced the steady-state condition. Comparing the PCM temperature contours at 5400 s in cases 2 and 3 revealed this fact.

Discussion and Conclusion

In the present study, the influence of multiple PCM on improving the melting process of a

vertical triple-tube heat exchanger in the presence of a middle plate was explored. For this purpose, the contours of PCM liquid fraction and temperature were comprehensively compared for various configurations at different times. According to the reported results, the addition of multiple PCM improved the thermal performance of the energy storage system compared to the corresponding cases in the presence of RT-35. Furthermore, it was revealed that this improvement in the thermal performance of the heat storage unit was more noticeable compared to the other scenarios in which the inner and outer tubes were filled with RT-26 and RT-35, respectively. Based on the numerical data presented in the paper, adding

multiple PCM boosted the energy storage rate of case 1-3 by 13.72% compared to that of case 1-2. Furthermore, the simultaneous usage of upper and lower plates in addition to multiple PCM (case 2-3) increased the energy storage rate to 87.34% compared to that of case 1-2. Ultimately, adding middle, upper, and lower plates to the heat exchange unit in the presence of the multiple PCM resulted in an increase of 158.41% compared to case 1-2. The current research showed that the simultaneous usage of multiple PCM in addition to the geometry modification resulted in a considerable increase in the energy storage rate.

مطالعه عددی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده چندگانه بر بهبود عملکرد یک سیستم ذخیره

حرارتی در حضور صفحه میانی

عقیل ایرانمنش^{۱*}، علی قربانی^۲، هادی فرزنان^۳

^۱ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

iranmanesh.aghil@ujiroft.ac.ir

^۲ فارغ التحصیل رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران، m.alighorbani1999@gmail.com

^۳ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، کرمان، ایران

hadi.farzan@gmail.com

چکیده: در مطالعه حاضر، شبیه سازی عددی فرایند ذوب یک

مبدل حرارتی سه لوله ای قائم در حضور ماده تغییر فاز دهنده چندگانه و صفحه میانی مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه سازی عددی در نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۲۰ با استفاده از روش

آنتالپی - تخلخل مدل سازی شده است. دمای سیال داغ گذرنده از

مبدل حرارتی ۵۰ درجه سانتی گراد و دمای اولیه مبدل حرارتی ۱۵

درجه سانتی گراد می باشد. جریان سیال داغ گذرنده از سیستم

ذخیره حرارتی به صورت غیرهمسو از مجراهای داخلی و خارجی

عبور می کند. رژیم جریان عبور از مبدل حرارتی آرام فرض شده

است. برای ارزیابی میزان تأثیر ماده تغییر فاز دهنده چندگانه و

صفحه میانی بر بهبود کارایی حرارتی سیستم ذخیره انرژی،

کانتورهای دمای ماده تغییر فاز دهنده و کسر حجمی سیال برای

ماده تغییر فاز دهنده چندگانه و ماده تغییر فاز دهنده تک در حالات

مختلف با هم مقایسه شده اند. بر اساس نتایج عددی گزارش شده،

استفاده هم زمان از ماده تغییر فاز دهنده چندگانه (ماده تغییر

فاز دهنده با دمای ذوب کمتر در محفظه داخلی و ماده تغییر

فاز دهنده با دمای ذوب بیشتر در محفظه بیرونی) و همچنین

صفحات بالایی، پایینی و میانی سبب افزایش انرژی حرارتی

ذخیره شده در مبدل حرارتی تا ۱۵۸/۴۱٪ خواهد شد.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

۱. مقدمه

توسعه‌ی روزافزون سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، امروزه به‌عنوان یکی از بهترین راهکارها جهت مدیریت ناترازی میان تولید و مصرف در مقیاس‌های گوناگون شناخته می‌شود. این ضرورت وقتی دوچندان می‌شود که بدانیم چارچوب فعالیت‌های بشری به‌طور کامل بر پایه انرژی استوار بوده و در سال‌های اخیر، تقاضا در بخش‌های صنعتی و خانگی به شکل فزاینده‌ای رشد کرده است. اگرچه سوخت‌های فسیلی تاکنون ستون اصلی تأمین این احتیاجات بوده‌اند، اما مخاطرات زیست‌محیطی برآمده از آن‌ها، ازجمله بحران گرمایش جهانی و تهدید اکوسیستم‌های قطبی، لزوم گذار به سمت انرژی‌های پاک را به یک اولویت بین‌المللی، بیش‌ازپیش نمایان کرده است. در همین راستا، متخصصان حوزه‌ی انرژی اتفاق‌نظر دارند که با تلفیق منابع انرژی تجدیدپذیر و فناوری‌های پیشرفته ذخیره‌سازی، می‌توان اثرات مخرب زیست‌محیطی را به کمترین میزان ممکن سوق داد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی^۱ با قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، طیف وسیعی از کاربردها شامل نیروگاه‌های خورشیدی و زمین‌گرمایی در ابعاد کلان جهت استمرار تولید برق تا بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای مسکونی را پوشش می‌دهند [۱،۲]. انباشت انرژی گرمایی را می‌توان از طریق دو شیوه شامل گرمای محسوس و نهان در بسترها و مکانیزم‌های گوناگون ذخیره نمود. لازم به ذکر است که دامنه عملیاتی سیستم‌های مبتنی بر گرمای نهان در حوزه صنعت، به‌مراتب وسیع‌تر از سایر حوزه‌ها ارزیابی می‌شود [۳]. بر پایه شاخصه‌های فنی و نحوه رفتار سامانه‌های انباشت انرژی، ذخیره‌ساز حرارتی گونه‌های متعددی را در برمی‌گیرد. در این میان، مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان واسطه‌های ذخیره‌ساز گرمای نهان قلمداد می‌شوند که حین فرایند تغییر فاز، حرارت را جذب یا آزاد می‌سازند [۴]. باین‌حال، ضریب انتقال حرارت نسبتاً پایین این مواد، به‌عنوان یک عامل محدودکننده در بهره‌برداری از آن‌ها در تجهیزات ذخیره‌ساز شناخته می‌شود. ازاین‌رو تا به امروز استراتژی‌های متفاوتی توسط محققان این حیطه جهت بهبود هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده پیشنهاد شده است. این راهکارها شامل اصلاح هندسه^۲ [۵]، اضافه نمودن نانوذرات [۶] و محیط متخلخل به ماده تغییر فاز دهنده [۷] و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده چندگانه^۳ [۸] می‌باشد.

یکی از کارآمدترین استراتژی‌های عملیاتی جهت جبران ضریب هدایت حرارتی پایین مواد تغییر فاز دهنده، بهره‌گیری از پیکربندی مواد تغییر فاز دهنده چندگانه در بستر سامانه‌های ذخیره‌ساز است [۹،۱۰]. در این رویکرد، استفاده هم‌زمان از RT26 و RT35، درواقع باعث ایجاد یک تعادل حرارتی در مبدل می‌شود. ماده تغییر فاز دهنده RT26 به دلیل اینکه دمای ذوب پایین‌تری دارد فرایند ذخیره‌سازی انرژی را خیلی سریع شروع می‌کند و مقدار زیادی از گرما را جذب می‌کند؛ اما مشکل آن این است که هر چه بیشتر ذوب می‌شود اختلاف دمای آن با دمای منبع گرم سریعاً کاهش یافته و سرعت جذب گرما کم می‌شود. ماده تغییر فاز دهنده RT35 دیرتر شروع به ذوب شدن می‌کند و مقدار کمتری گرما جذب می‌کند اما نقش یک تثبیت‌کننده را ایفا می‌کند. از آنجایی‌که ماده تغییر فاز دهنده RT35 دیرتر نسبت به جذب گرما و افزایش دما واکنش نشان می‌دهد، لذا اختلاف دمای بین منبع گرم و ماده تغییر فاز دهنده را برای مدت‌زمان بیشتری حفظ می‌نماید. از معایب این ماده تغییر فاز دهنده می‌توان به گرمای نهان پایین آن اشاره نمود. با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده چندگانه می‌توان از مزایای هر ماده تغییر فاز دهنده استفاده نمود و راندمان حرارتی سیستم ذخیره حرارتی را تا حد امکان ارتقا داد [۱۱،۱۲].

ارتقای عملکرد مبدل‌های حرارتی در بخش‌های نیروگاهی و صنعتی، همواره یکی از اولویت‌های حوزه انرژی بوده است. تحقیقات اخیر بر نقش کلیدی پیکربندی‌های مواد تغییر فاز دهنده چندگانه جهت یکنواخت‌سازی نرخ انتقال حرارت متمرکز است. این راهکار با چیدمان هوشمندانه مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب متفاوت، از کاهش پتانسیل حرارتی در طول مبدل جلوگیری کرده و زمان فرایند تغییر فاز را به حداقل می‌رساند. با توجه به اهمیت این موضوع، در ادامه به مطالعه برجسته‌ترین مطالعاتی که اخیراً بر بهینه‌سازی سیستم‌ها با ماده تغییر فاز دهنده چندگانه تمرکز داشته‌اند، پرداخته شده است. مهدی و همکاران [۸] به ارائه یک چیدمان جدید جهت بهبود کارایی حرارتی یک سیستم فتوولتائیک مجهز به واحد ذخیره حرارتی پرداختند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی به‌دست‌آمده، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده چندگانه بر اساس چیدمان پیشنهادی زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده و کارایی حرارتی سیستم فتوولتائیک را به ترتیب به میزان ۱۸٪ و ۳۳٪ افزایش داد. ازرا و همکاران [۱۳] به مطالعه عددی یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گرمای نهان با تعداد دلخواه مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. در مطالعه مذکور، به بررسی

1. Thermal Energy Storage (TES)
2. Geometry modification
3. Multiple PCM

اگرچه تاکنون مطالعات بسیار زیادی در زمینه استفاده از صفحه میانی در مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم و همچنین به‌کارگیری ماده تغییر فازدهنده چندگانه در مبدل‌های حرارتی به‌صورت مجزا انجام گردیده است، ولی اثرات ترکیبی استفاده از ماده تغییر فازدهنده چندگانه در حضور صفحه میانی مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم تاکنون مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر، تأثیر اضافه نمودن ماده تغییر فازدهنده چندگانه به انضمام نقش هدایتی صفحه میانی بر بهبود عملکرد حرارتی مبدل واکاوی خواهد شد. هدف اصلی این پژوهش، بهره‌گیری از مزیت اضافه نمودن صفحه میانی مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم و ماده تغییر فازدهنده چندگانه جهت جبران ضریب هدایت پایین مواد تغییر فازدهنده و در نتیجه، کاهش زمان ذوب و افزایش نرخ ذخیره انرژی حرارتی می‌باشد. در این راستا، با تجزیه و تحلیل نتایج عددی شامل کانتورهای کسر حجمی مایع و توزیع دمای ماده تغییر فازدهنده چندگانه، چیدمان‌های مختلف مواد تغییر فازدهنده در حضور صفحه میانی با هم مقایسه شده و بهینه‌ترین حالت جهت دستیابی به بالاترین عملکرد حرارتی تعیین خواهد شد.

۲. سیستم ذخیره گرمای نهان مورد مطالعه

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر صفحه میانی بر بهبود فرایند ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم در حضور ماده تغییر فازدهنده چندگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در سیستم مورد بررسی که از مواد تغییر فازدهنده چندگانه بهره می‌برد، تأثیر به‌کارگیری یا حذف صفحه میانی بر بهبود فرایند ذوب مواد تغییر فازدهنده به‌دقت واکاوی می‌گردد. جهت دستیابی به حداکثر تبادل گرمایی، مکانیزم جریان در این مبدل حرارتی لوله‌ای به‌صورت جریان غیرهمسو در نظر گرفته شده است به‌گونه‌ای که سیال گرم در مجرای داخلی حرکتی رو به بالا و در مجرای بیرونی حرکتی رو به پایین دارد. در بخش مدل‌سازی، با بهره‌گیری از ویژگی تقارن محوری، زمان و هزینه محاسباتی مسئله مورد مطالعه، کمینه گردیده است. مبنای این پژوهش بر پایه فرضیات مطالعات پیشین استوار است که بر نقش مثبت صفحه میانی در تسریع فرایند تغییر فاز تأکید داشتند. لذا تمرکز اصلی این پژوهش بر یافتن چیدمان ایده‌آل در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای حاوی مواد تغییر فازدهنده چندگانه و صفحه میانی با ضخامت ثابت ۸ میلی‌متر معطوف گشته است. روند تحقیق بدین‌صورت است که ابتدا رفتار ذوب لایه‌ای ماده تغییر فازدهنده تحلیل شده و سپس اثرات افزایش انتقال حرارت صفحه میانی بر بهبود عملکرد ذوب در طرح‌واره‌های

تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل سرعت و دمای سیال داغ ورودی، تعداد ردیف‌ها، تعداد مواد تغییر فازدهنده و بازه دمای ذوب مواد تغییر فازدهنده بر راندمان سیستم ذخیره حرارتی پرداختند و در نهایت روشی بهینه جهت کمینه نمودن زمان ذوب ماده تغییر فازدهنده تحت شرایط موجود ارائه نمود.

کومار و هالدر [۱۱] در یک مطالعه عددی، یک سامانه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی پوسته لوله‌ای عمودی را با به‌کارگیری ماده تغییر فازدهنده دوگانه به‌صورت لایه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه مذکور تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله تعداد لایه‌ها، نسبت شعاع و عدد رینولدز بر عملکرد سامانه ذخیره‌سازی انرژی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه مذکور نشان داد که استفاده از ساختار چندلایه سبب بهبود فرایندهای ذوب و انجماد نسبت به آرایش تک لایه گردید. کریم و همکاران [۱۴] در یک پژوهش، عملکرد یک سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان چندصفحه‌ای را با استفاده از مواد تغییر فازدهنده چندگانه مورد ارزیابی قرار دادند. بین صفحات متعددی با مواد تغییر فاز RT-25 و RT-21 پر شدند و تأثیر پارامترهای هندسی و حرارتی بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. نهایتاً نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که این پارامترها در افزایش یا کاهش عملکرد حرارتی سیستم نقش مهمی داشتند. سیابی و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای تجربی و عددی، تأثیر استفاده از ماده تغییر فازدهنده چندگانه را در یک مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که چیدمان چندگانه نسبت به حالت‌های تک‌ماده‌ای، منجر به افزایش میانگین دمای سیستم و بهبود عملکرد حرارتی گردید. همچنین تحلیل‌های انجام گرفته نشان داد که در یک حجم ثابت، افزایش طول مخزن نسبت به عرض آن سبب کاهش زمان ذوب ماده تغییر فازدهنده شد. آویلز و همکاران [۱۶] در پژوهشی به مطالعه یک سیستم ذخیره حرارتی چند لایه جدید با تراکم انرژی ذخیره‌شده بالا پرداختند. در سیستم مورد مطالعه ماده تغییر فازدهنده با نمک مذاب جهت تثبیت عملکرد حرارتی و فرایند ذوب و انجماد پایدار ترکیب گردید. در مطالعه مذکور همچنین پاسخ حرارتی و عملکرد فنی-اقتصادی سیستم ذخیره حرارتی برای یک جفت ماده تغییر فازدهنده مشخص مورد بررسی قرار گرفت. سیستم بهینه ارائه شده توسط نویسندگان نهایتاً منجر به کاهش هزینه پله‌ای برق و حرارت به میزان ۲/۶ و ۱۲/۴٪ گردید.

مختلف سنجیده می شود. ساختار تفکیکی حالت های مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده اند. RT-26 و RT-35 به عنوان مواد تغییر فاز دهنده و آب به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده که مشخصات ترموفیزیکی آنها در جداول (۲) و (۳) درج گردیده اند. همچنین، طرحواره های دوبعدی و سه بعدی مربوط به حالات مورد بررسی در پژوهش حاضر در شکل (۱) ارائه شده اند.

جدول (۱): حالات مختلف مورد مطالعه در پژوهش حاضر

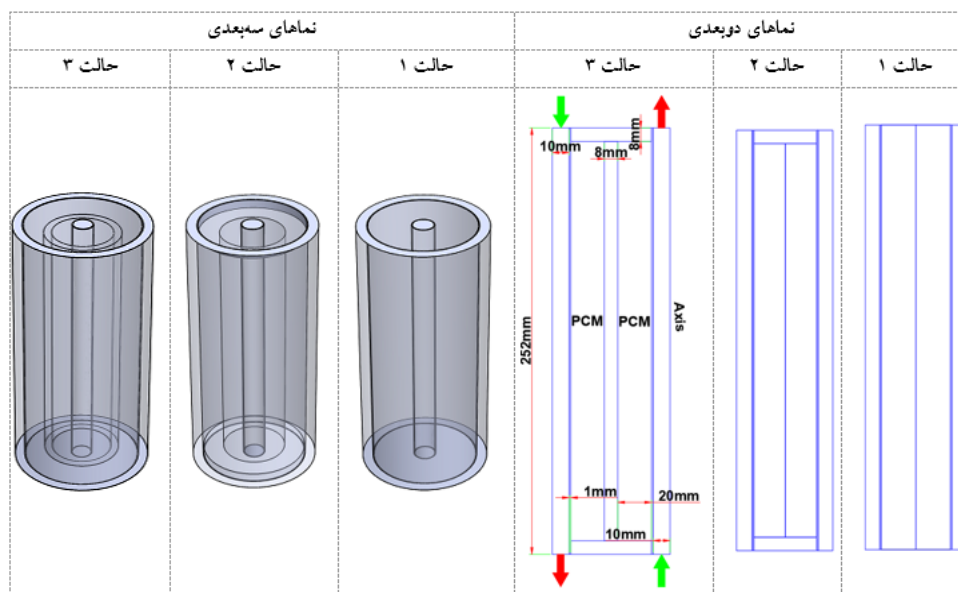
محفظه خارجی	محفظه داخلی	حالت	حالت
RT-26	RT-26	حالت ۱-۱	حالت ۱
RT-35	RT-35	حالت ۲-۱	
RT-35	RT-26	حالت ۳-۱	
RT-26	RT-35	حالت ۴-۱	
RT-26	RT-26	حالت ۱-۲	حالت ۲
RT-35	RT-35	حالت ۲-۲	
RT-35	RT-26	حالت ۳-۲	
RT-26	RT-35	حالت ۴-۲	
RT-26	RT-26	حالت ۱-۳	حالت ۳
RT-35	RT-35	حالت ۲-۳	
RT-35	RT-26	حالت ۳-۳	
RT-26	RT-35	حالت ۴-۳	

جدول (۲): خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی در پژوهش حاضر [۸]

خواص	ρ_L [kg/m ³]	ρ_s [kg/m ³]	L_f [kJ/kg]	C_p [kJ/kg.K]	k [W/m.K]	μ [N.s/m ²]	$T_{Liquidus}$ [K]	$T_{Solidus}$ [K]	β [J/K]
RT-35	۷۷۰	۸۶۰	۱۶۰	۲/۰	۰/۲	۰/۰۲۳	۳۰۸	۳۰۲	۰/۰۰۰۵
RT-26	۷۵۰	۸۶۰	۱۸۰	۲/۰	۰/۲	۰/۰۲۳	۲۹۹	۲۹۸	۰/۰۰۰۵

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی سیال (آب) داغ ورودی به مبدل حرارتی [۵]

خواص	ρ [kg/m ³]	T [K]	C_p [kJ/kg.K]	k [W/m.K]	μ [N.s/m ²]
آب	۹۸۷	۳۲۳/۲	۴/۰۶۶	۰/۶۴۳۹	۰/۰۰۰۵۳۱



شکل (۱): طرحواره های دوبعدی و سه بعدی حالت های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

شایان به ذکر است که پارامتر S_L در معادله (۴)، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$S_L = \frac{\partial \varepsilon \rho_f \lambda L_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \vec{V} \lambda L_f) \quad (5)$$

آنتالپی کل که شامل مجموع دو مؤلفه گرمای محسوس و نهان می‌باشد عبارت است از:

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

که جمله h (آنتالپی محسوس) از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_{p,f} dT \quad (7)$$

۴. تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه مسئله

با اتکا به ماهیت هندسی سیستم و وجود تقارن محوری، در مرز سمت راست واحد ذخیره‌ساز انرژی مورد مطالعه، شرط مرزی تقارن مطابق با روابط ذیل اعمال شده است:

$$u = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

در سایر وجوه هندسی، به‌استثنا مقاطع ورود و خروج جریان سیال عامل، تمامی دیواره‌های پیرامونی (اعم از دیواره بالایی پایینی و سمت چپ) به‌صورت عایق و با فرض عدم لغزش در نظر گرفته شده‌اند. فرمول‌بندی حاکم بر این دیواره‌ها به شرح زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

دیواره عمودی

$$\vec{V} = 0 \rightarrow u = 0, v = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

دیواره افقی

$$\vec{V} = 0 \rightarrow u = 0, v = 0$$

در خصوص مقاطع جریان، برای ناحیه خروجی سیال عامل، شرط مرزی فشار خروجی لحاظ شده است. همچنین در مقطع ورودی، شرط مرزی سرعت ورودی بر مبنای عدد رینولدز ۱۰۰۰ اعمال گردیده است که جزئیات آن برای لوله‌های داخلی و خارجی در روابط (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده‌اند:

$$T = 323.2 \text{ K} \quad (11)$$

ناحیه ورودی لوله داخلی

$$\vec{V} = 0\vec{i} + 0.0268997\vec{j}$$

۳. فرمول‌بندی و روابط ریاضی حاکم بر مسئله

در تحقیق پیش رو، جهت تحلیل محاسباتی فرایند تغییر فاز مواد تغییر فازدهنده چندگانه، الگوی آنتالپی-تخلخل مبنای کار قرار گرفته است. به‌منظور ساده‌سازی مدل‌سازی مکانیزم ذوب در سامانه ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، فرضیات ذیل لحاظ شده‌اند [۱۷، ۱۸]

- سیال در فاز مایع به‌صورت نیوتنی و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است.
- رژیم جریان مورد مطالعه آرام فرض شده است.
- در تحلیل مبادلات گرما، تعادل حرارتی میان فازها برقرار است.
- از تغییرات حجمی ماده حین تغییر فاز چشم‌پوشی شده است.
- تلفات لزجت در پژوهش حاضر ناچیز در نظر گرفته شده‌اند.
- تغییرات چگالی با استفاده از تقریب بوزینسک مدل‌سازی گردیده است.

چارچوب کلی معادلات حاکم بر پدیده تغییر فاز مواد تغییر فازدهنده عبارت‌اند از [۱۹]:
معادله بقای جرم (پایستگی):

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

معادله مومنتوم:

$$\begin{aligned} \rho_f \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} &+ \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \\ &= -\nabla \rho + \frac{\mu_f}{\varepsilon} (\nabla^2 \cdot \vec{V}) \\ &- \rho_{f,ref} \beta_f \varepsilon (T - T_{ref}) \vec{g} - \vec{s} - \vec{F} \end{aligned} \quad (2)$$

که عبارت S از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vec{S} = A_m \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} \vec{V} \quad (3)$$

در اینجا، مقدار ثابت مرتبط با ناحیه خمیری معادل 10^6 در نظر گرفته شده است.

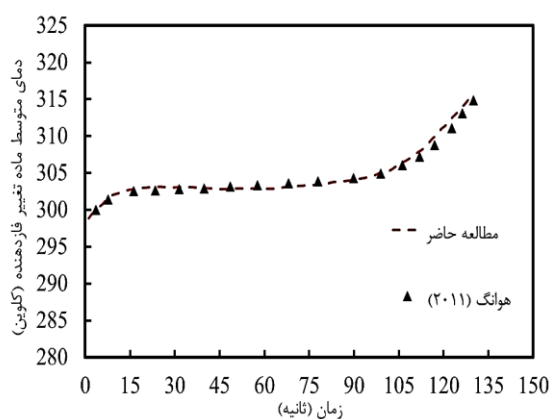
معادله انرژی:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon \rho_f C_{p,f} T}{\partial t} + \nabla(\rho_f C_{p,f} \vec{V} T) \\ = \nabla(K_e \nabla T) - S_L \end{aligned} \quad (4)$$

بر زمان ذوب حالت مورد بررسی داشته است. از این رو، جهت بهینه سازی زمان محاسبات و حفظ دقت، مقدار 0.2 ثانیه به عنوان گام زمانی مبنا در شبیه سازی های این تحقیق انتخاب گردید. به منظور صحت سنجی روش عددی برگزیده شده در پژوهش حاضر، نتایج حاصله با یافته های عددی ارائه شده توسط هوانگ (۲۰۱۱) [۲۰] مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که در نمودار مقایسه ای شکل (۳) مشهود می باشد، انطباق بسیار مطلوبی میان نتایج حاصله از شبیه سازی فعلی و نتایج ارائه شده توسط هوانگ (۲۰۱۱) [۲۰] برقرار است که این امر حاکی از دقت بسیار قابل قبول روش مورد استفاده در پژوهش حاضر می باشد.

جدول (۴): نتایج استقلال از گام زمانی برای تعداد المان 281680

گام زمانی (ثانیه)	0.25	0.2	0.15
زمان ذوب (ثانیه)	۴۷۱۸	۴۷۱۲	۴۶۹۱



شکل (۳): مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج هوانگ (۲۰۱۱) [۲۰]

۶. نتایج و بحث

در این قسمت تأثیر مواد تغییر فاز دهنده چندگانه بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم در حضور صفحه میانی با مقایسه کانتورهای کسر حجمی سیال و دمای ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

$$(12) \quad T = 323.2 \text{ K} \quad \text{ناحیه ورودی لوله}$$

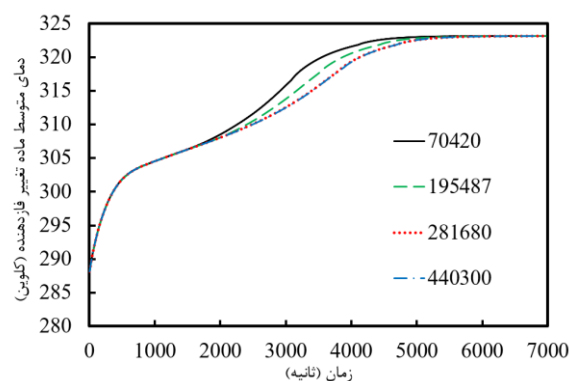
$$\vec{V} = 0\vec{i} - 0.0268997\vec{j} \quad \text{خارجی}$$

$$(13) \quad P = P_{atm} \quad \text{ناحیه خروجی لوله داخلی و خارجی}$$

در پژوهش حاضر شرایط اولیه برای سرعت ها، دمای اولیه، فشار نسبی و کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده برابر با 0 ، 288.5 کلوین، 0 و 0 می باشد.

۵. مطالعه استقلال از شبکه و اعتبار سنجی روش عددی

در این تحقیق، شبیه سازی عددی فرایند تغییر فاز در سیستم ذخیره انرژی حرارتی با بهره گیری از نرم افزار آنسیس فلوئنت ۲۰۲۰ نسخه R2 انجام شده است. حدود همگرایی فرض شده برای حل معادله انرژی 10^{-6} و برای معادلات مربوط به جرم و مومنتوم 10^{-4} می باشد. در تمامی مراحل حل، اندازه گام زمانی به صورت ثابت در نظر گرفته شده و حداکثر تکرار مجاز برای هر گام 200 در نظر گرفته شده است. همچنین جهت اعتبار سنجی مدل سازی، بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه انجام گرفت که جزئیات آن برای حالت $3-3$ در شکل (۲) قابل مشاهده می باشد. با توجه به شکل (۲) نتایج حل عددی برای 281680 المان مستقل از شبکه می باشد.



شکل (۲): یافته های مرتبط با بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی

علاوه بر این، جهت حصول اطمینان از صحت نتایج عددی و بررسی میزان حساسیت نتایج به گام زمانی، محاسبات عددی برای سه گام زمانی مجزای 0.15 ، 0.20 و 0.25 ثانیه (برای تعداد ثابت 281680 المان) تکرار شد. خروجی های حاصل از ارزیابی استقلال از گام زمانی در جدول (۴) نشان شده اند. با بررسی این نتایج، مشخص گردید که تغییر در اندازه گام زمانی تأثیر ناچیزی

۱.۶. تحلیل عملکرد حرارتی سیستم با چیدمان مواد تغییر فازدهنده چندگانه در حضور صفحه میانی

در این بخش تأثیر بهره‌گیری از مواد تغییر فازدهنده چندگانه به انضمام صفحه میانی بر بهبود فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی سه لوله‌ای قائم موردبررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور کانتورهای کسر حجمی سیال و توزیع دما برای حالات مختلف مورد مطالعه در شکل‌های (۴) و (۵) و (۶) به‌وضوح نشان داده شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، سیال داغ با دمای ورودی ۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌صورت غیرهمسو از لوله‌های داخلی و خارجی عبور کرده و حرارت آن از طریق دیواره‌ها به صفحه میانی و در نهایت به ماده تغییر فازدهنده با دمای اولیه ۱۵ درجه سانتی‌گراد منتقل می‌شود. با توجه به شکل (۴) در حالت ۱ که پیکربندی مبدل حرارتی در غیاب صفحات بالا، پایین و صفحه میانی است تنها اثر جابه‌جایی طبیعی است که باعث ذوب ماده تغییر فازدهنده در محفظه می‌شود. در تمامی حالات ۱ نواحی تحتانی تحت تأثیر جابه‌جایی طبیعی نیست و لذا دیرتر از سایر نواحی ذوب شده است. با توجه به شکل (۴) در حالت‌هایی که از ماده تغییر فازدهنده RT-35 استفاده شده است، با توجه به بالاتر بودن دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده فوق نسبت به RT-26، در زمان‌های پایانی فرایند ذوب (۸۷۰۰ ثانیه) مقداری از ماده تغییر فازدهنده در محفظه داخلی و یا محفظه بیرونی به‌صورت جامد باقی‌مانده است. همچنین با توجه به اینکه محفظه خارجی مبدل حرارتی از سطح مؤثر به‌مراتب بیشتری نسبت به محفظه داخلی برخوردار می‌باشد، در حالت ۱-۲، فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده موجود در محفظه خارجی با سرعت نسبتاً بالاتری نسبت به ماده تغییر فازدهنده محفظه داخلی رخ داده است. از آنجایی که دمای ذوب RT-26 نسبت به RT-35 پایین‌تر می‌باشد، استفاده از RT-26 در محفظه داخلی (به دلیل داشتن سطح مؤثر کمتر) و RT-35 در محفظه خارجی (به دلیل داشتن سطح مؤثر بالاتر) منجر به یکنواختی بهتر دمای ماده تغییر فازدهنده نسبت به سایر حالات خواهد شد.

با توجه به شکل (۵)، اضافه کردن صفحات در بالا و پایین مبدل حرارتی سبب بهبود فرایند تغییر فاز در تمامی حالات می‌گردد. در حالت ۲-۲ که در دو محفظه جنس مواد تغییر فازدهنده یکسان است در زمان ۵۴۰۰ ثانیه مقدار زیادی از ماده

تغییر فازدهنده هنوز در محفظه داخلی به‌صورت جامد باقی‌مانده است. همانند حالت ۱، استفاده از ماده تغییر فازدهنده چندگانه (حالت ۲-۳) سبب متعادل‌تر شدن فرایند تغییر فاز در دو محفظه داخلی و خارجی مبدل حرارتی گردیده و نهایتاً سبب بهبود فرایند تغییر فاز خواهد شد. علی‌رغم اینکه استفاده از RT-35 در محفظه داخلی و RT-26 در محفظه بیرونی سبب بهبود فرایند ذوب نسبت به حالت ۲-۲ می‌گردد، ولی کارایی حرارتی آن به دلیل سطح مؤثر پایین‌تر محفظه داخلی و بالاتر بودن دمای ذوب RT-35، نسبت به حالت ۲-۳ کم‌تر می‌باشد. با توجه به شکل (۵)، در تمامی حالات ۲ مواد تغییر فازدهنده‌ای که در نواحی میانی و دور از سطوح انتقال حرارت بالا و پایین هستند، کمترین دما را تجربه کرده‌اند.

با توجه به شکل (۶)، اضافه کردن صفحه میانی به انضمام صفحات بالا و پایین سبب بهبود فرایند ذوب در تمامی حالات مورد مطالعه می‌گردد. همان‌طور که در اشکال (۴)، (۵) و (۶) مشاهده می‌گردد، اضافه کردن صفحه میانی سبب متعادل‌تر شدن دما در حالت ۲-۳ نسبت به حالات ۲-۱ و ۲-۲ گردیده است. همچنین استفاده هم‌زمان از صفحه میانی و ماده تغییر فازدهنده چندگانه سبب بهبود فرایند تغییر فاز به‌صورت کاملاً چشمگیر گردیده است. در زمان ۵۴۰۰ ثانیه در حالت ۳، دمای ماده تغییر فازدهنده به حالت پایا رسیده، درحالی‌که در هیچ‌کدام از حالات ۲ دمای ماده تغییر فازدهنده به حالت پایا نرسیده است. مقایسه کانتور دمای ماده تغییر فازدهنده در زمان ۵۴۰۰ ثانیه در حالات ۲ و ۳، گواهی این مطلب می‌باشد. مطابق با شکل (۶)، در زمان ۴۲۰۰ ثانیه حجم ماده تغییر فازدهنده بیشتری در حالت ۳-۴ نسبت به حالت ۳-۳ به دلیل داشتن سطح مؤثر کمتر به‌صورت جامد باقی‌مانده است.

مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در حالت‌های مختلف مورد مطالعه در جدول (۵) نمایش داده شده‌اند. در تمامی حالات مورد مطالعه، اضافه کردن ماده تغییر فازدهنده چندگانه سبب بهبود فرایند ذوب نسبت به نتایج حاصل از مبدل حرارتی با ماده تغییر فازدهنده RT-35 در محفظه بیرونی و داخلی خواهد شد. همچنین این میزان بهبود در حالتی که ماده RT-26 در محفظه داخلی و RT-35 در محفظه بیرونی تعبیه شده است نسبت به حالات ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ چشمگیرتر می‌باشد. نتایج مشابهی با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر توسط محققین Z

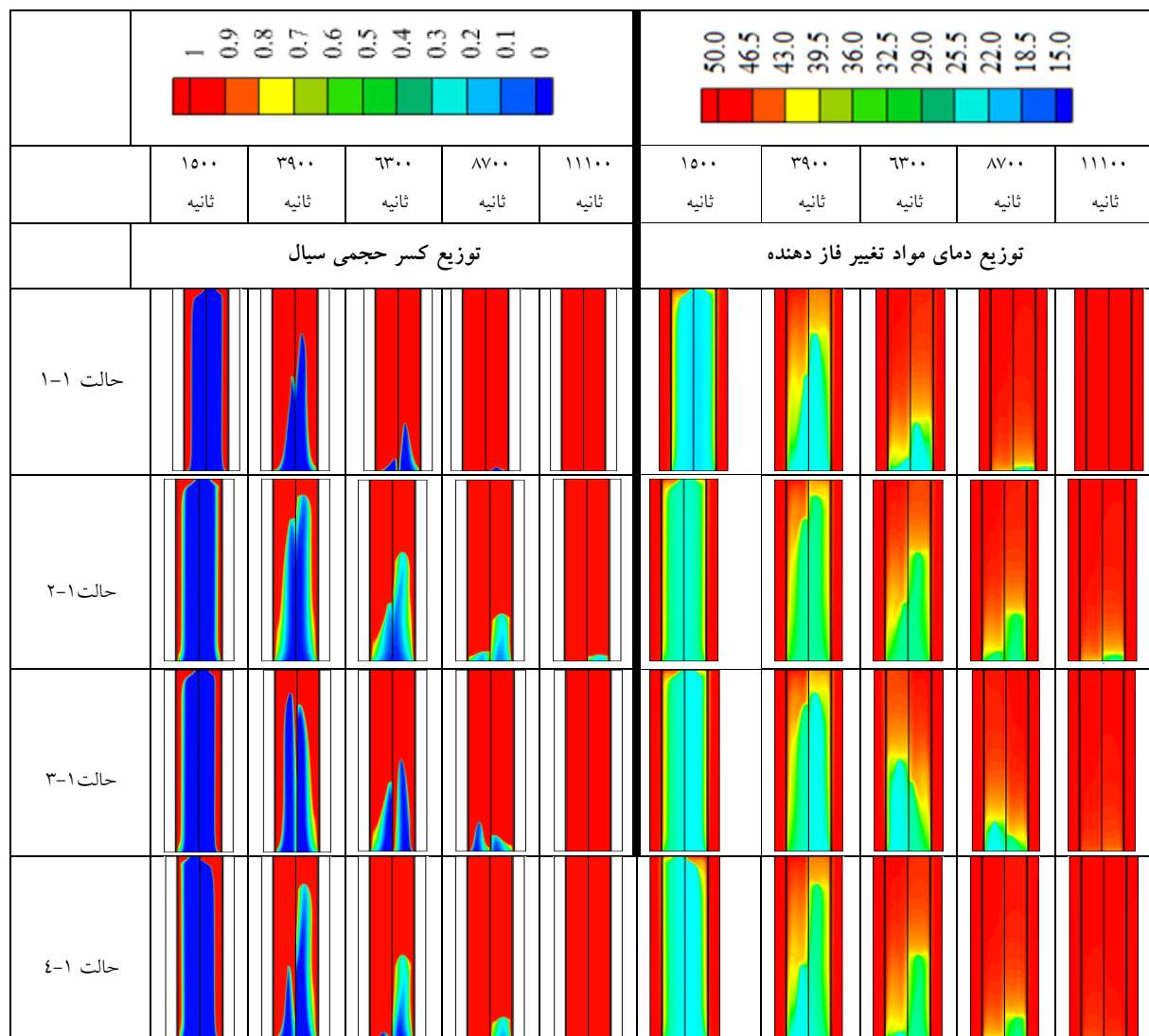
با توجه به نتایج عددی ارائه شده در جدول (۵)، افزودن ماده تغییر فاز دهنده چندگانه (حالت ۱-۳) سبب بهبود میزان انرژی حرارتی ذخیره شده به میزان $13/72\%$ و کاهش زمان ذوب $10/42\%$ نسبت به حالت ۱-۲ خواهد شد. همچنین افزودن صفحات بالایی و پایینی و همچنین اضافه کردن ماده تغییر فاز دهنده چندگانه (حالت ۲-۳) سبب بهبود میزان انرژی حرارتی ذخیره شده به میزان $87/34\%$ و کاهش زمان ذوب به میزان $46/72\%$ نسبت به حالت ۱-۲ خواهد شد. میزان افزایش انرژی ذخیره شده و کاهش زمان ذوب در نهایت با اضافه نمودن صفحات بالایی، پایینی و میانی و همچنین استفاده از ماده تغییر فاز دهنده چندگانه (حالت ۳-۳) به $58/41\%$ و 61% نسبت به حالت ۱-۲ خواهد رسید. این افزایش کارایی حرارتی مبدل مورد مطالعه را می توان به نقش هدایتی مؤثر صفحات میانی، بالایی و پایینی و همچنین ماده تغییر فاز دهنده چندگانه نسبت داد.

در اشکال (۷) تا (۱۲) تغییرات کسر حجمی سیال و همچنین دمای ماده تغییر فاز دهنده حالات مورد مطالعه بر حسب زمان ارائه شده اند.

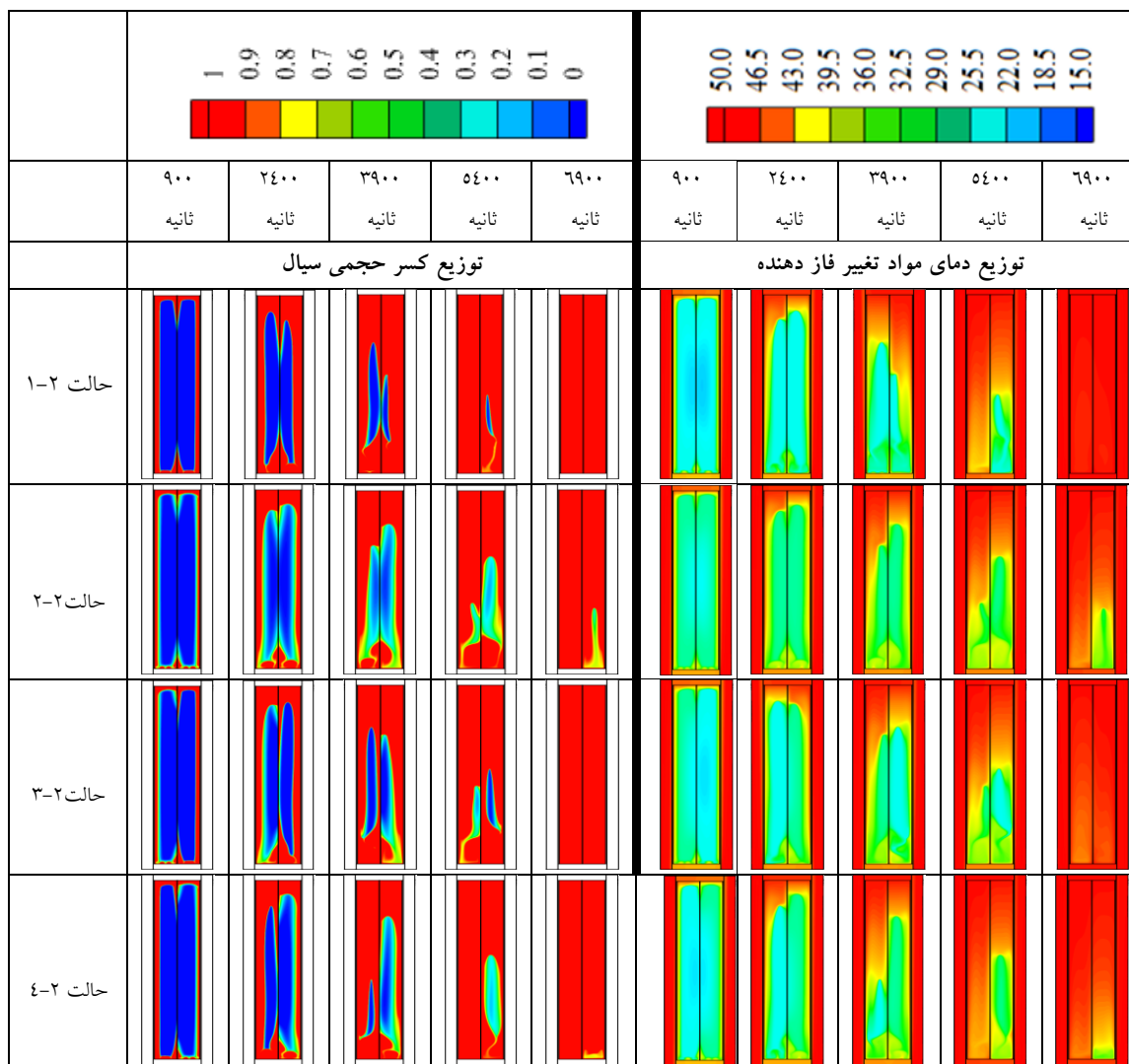
در تمامی حالات مورد مطالعه، حالتی که محفظه داخلی و خارجی آن با RT-35 پر گردیده است طولانی ترین فرایند تغییر فاز را تجربه نموده است. همچنین اضافه نمودن ماده تغییر فاز دهنده چندگانه سبب بهبود سرعت فرایند تغییر فاز نسبت به

حالت مذکور گردیده است. با توجه به شکل (۹) تا قبل از زمان ۶۰۰۰ ثانیه فرایند تغییر فاز حالت ۲-۴ به دلیل دمای ذوب پایین تر RT-26 و سطح مؤثر بیشتر محفظه خارجی از فرایند تغییر فاز حالت ۲-۳ پیشی گرفته است. بعد از زمان ۶۰۰۰ ثانیه و کاهش اختلاف دمای محفظه خارجی با سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی بیرونی، کارایی حرارتی حالت ۲-۴ نسبت به حالت ۲-۳ کاهش می یابد.

با توجه به اشکال (۸)، (۱۰) و (۱۲)، افزودن صفحات بالایی و پایینی و همچنین صفحه میانی سبب کاهش زمان رسیدن مبدل حرارتی به حالت پایا خواهد شد. در تمامی حالات ۱، ۲ و ۳ در زمان های ابتدایی دمای مبدل حرارتی که محفظه داخلی و خارجی آن با RT-35 پر گردیده است نسبت به سایر حالات به شدت افزایش می یابد. این افزایش دما را می توان به دمای ذوب بالای RT-35 و حفظ اختلاف دما با سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی نسبت داد. با گذر زمان و افزایش دمای مبدل حرارتی فوق، اختلاف دما با سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی کاهش یافته و دمای متوسط ماده تغییر فاز RT-35 نسبت به سایر حالات افت قابل توجهی را تجربه خواهد نمود. لازم به ذکر است که مبدل حرارتی با ماده تغییر فاز دهنده RT-26 در محفظه داخلی و خارجی به دلیل گرمای نهان بالاتر بیشترین دمای متوسط ماده تغییر فاز دهنده را در زمان های انتهایی تجربه نموده است.



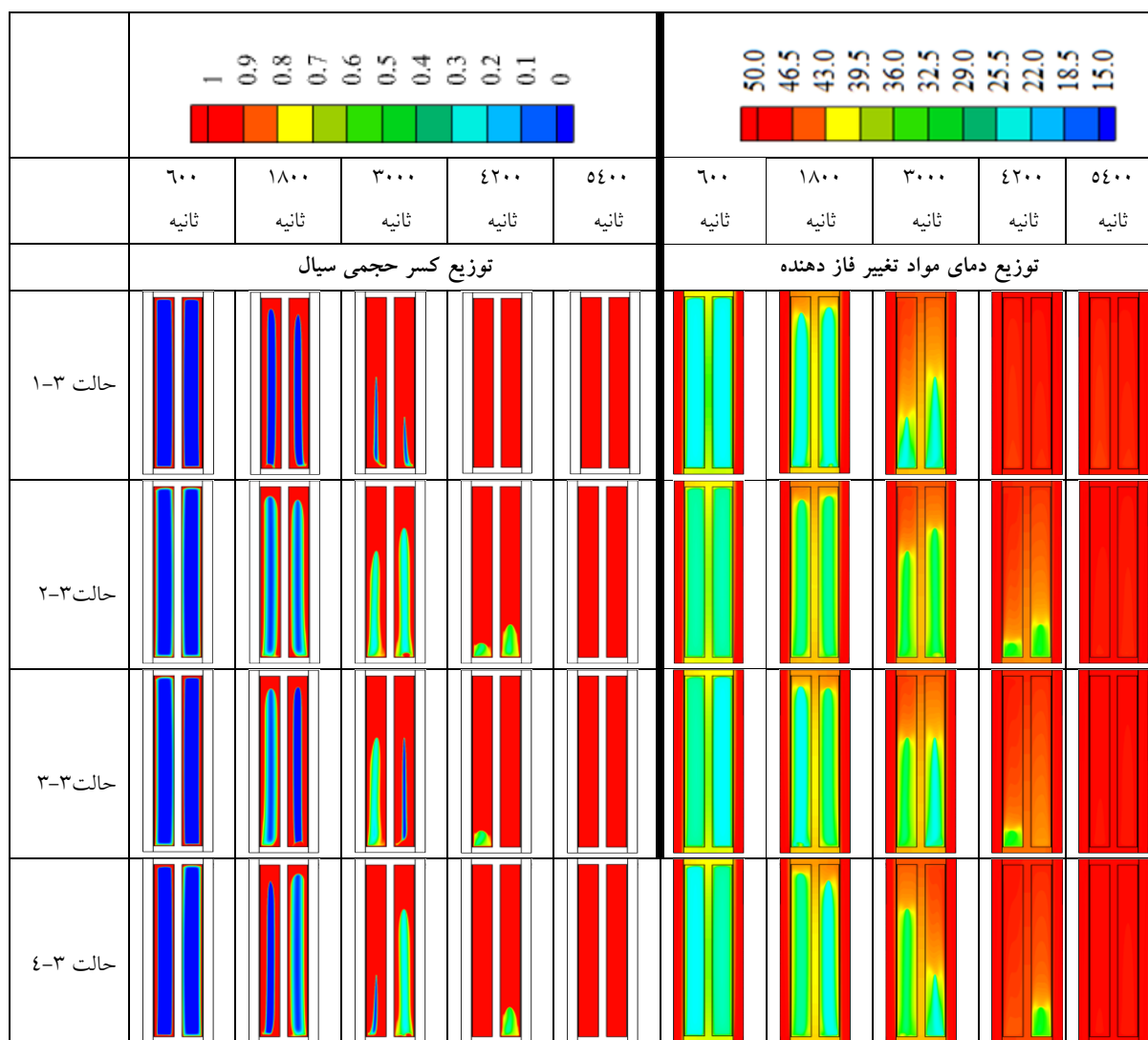
شکل (۴): توزیع کسر حجمی سیال و توزیع دمای مواد تغییر فاز دهنده برای فرآیند ذوب حالت ۱ در زمان‌های مختلف



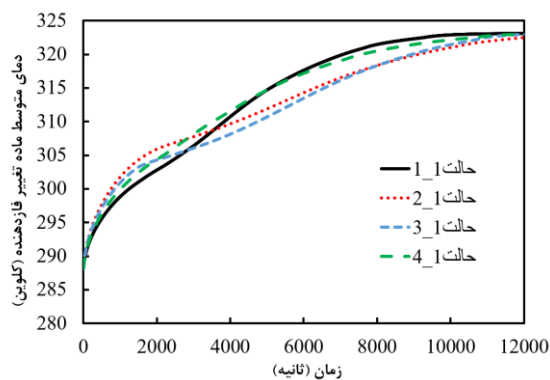
شکل (۵): توزیع کسر حجمی سیال و توزیع دمای ماده تغییر فاز دهنده برای فرآیند ذوب حالت ۲ در زمان‌های مختلف

جدول (۵): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره شده در حالت‌های مختلف

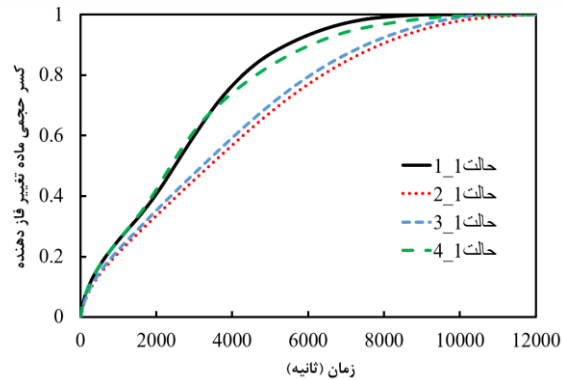
میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (وات)	زمان ذوب (ثانیه)	حالات مورد بررسی	میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (وات)	زمان ذوب (ثانیه)	حالات مورد بررسی	میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (وات)	زمان ذوب (ثانیه)	حالات مورد بررسی
۱۰۳/۹۴	۳۶۵۸	حالت ۱-۳	۶۴/۴۶	۵۹۲۱	حالت ۱-۲	۴۱/۷۸	۹۲۹۰	حالت ۱-۱
۷۲/۵۵	۵۰۱۴	حالت ۲-۳	۴۸/۸۷	۷۴۶۲	حالت ۲-۲	۳۰/۳۲	۱۲۰۹۲	حالت ۲-۱
۷۸/۳۵	۴۷۲۰	حالت ۳-۳	۵۶/۸۰	۶۴۴۲	حالت ۳-۲	۳۴/۴۸	۱۰۸۳۱	حالت ۳-۱
۷۷/۴۶	۴۹۰۷	حالت ۴-۳	۵۳/۶۷	۷۰۶۶	حالت ۴-۲	۳۳/۵۹	۱۰۷۲۸	حالت ۴-۱



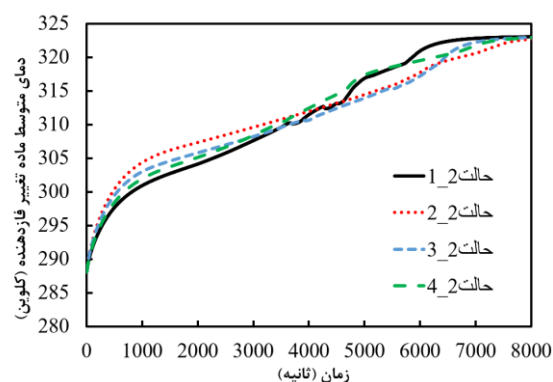
شکل (۶): توزیع کسر حجمی سیال و توزیع دمای ماده تغییر فاز دهنده برای فرایند ذوب حالت ۳ در زمان‌های مختلف



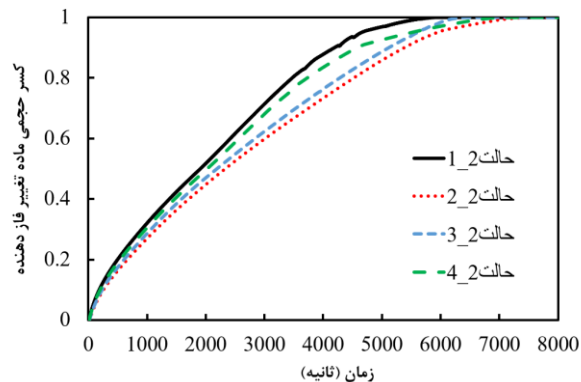
شکل (۸): نمودار تغییر دمای متوسط ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای حالت ۱ مورد مطالعه



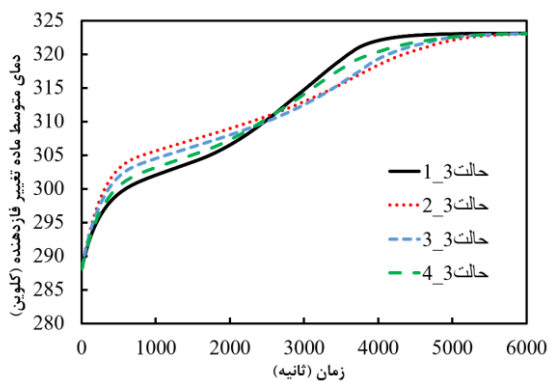
شکل (۷): نمودار تغییر کسر حجمی سیال بر حسب زمان برای حالت ۱ مورد مطالعه



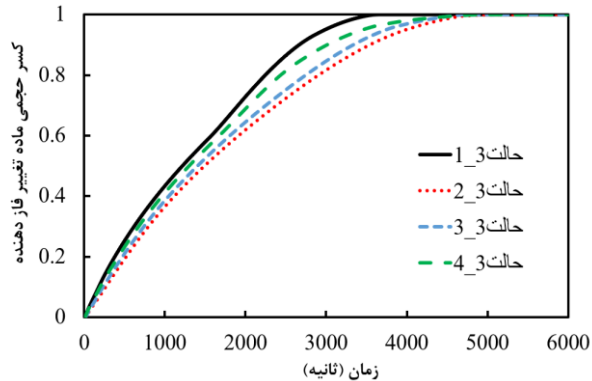
شکل (۱۰): نمودار تغییر دمای متوسط ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای حالت ۲ مورد مطالعه



شکل (۹): نمودار تغییر کسر حجمی سیال بر حسب زمان برای حالت ۲ مورد مطالعه



شکل (۱۲): نمودار تغییر دمای متوسط ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای حالت ۳ مورد مطالعه



شکل (۱۱): نمودار تغییر کسر حجمی سیال بر حسب زمان برای حالت ۳ مورد مطالعه

۷. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تأثیر ماده تغییر فازدهنده چندگانه بر بهبود فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم در حضور صفحه میانی موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور کانتورهای کسر حجمی سیال و دمای ماده مذکور در حالت چندگانه و تک با پیکربندی‌های مختلف و در زمان‌های گوناگون مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به نتایج عددی به‌دست‌آمده، اضافه کردن ترکیب مذکور سبب بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی نسبت به حالات متناظر و در حضور RT-35 گردید. میزان بهبود عملکرد حرارتی در حضور ترکیب مذکور در حالتی که ماده با دمای ذوب کمتر در محفظه داخلی و ماده با دمای ذوب بیشتر در محفظه بیرونی تعبیه گردید، نسبت به سایر حالات افزایش یافت. در مطالعه حاضر افزودن ماده تغییر فازدهنده چندگانه (حالت ۱-۳) سبب بهبود انرژی حرارتی ذخیره‌شده و کاهش زمان ذوب به میزان ۱۳/۷۲ و ۱۰/۴۲٪ نسبت به حالت ۲-۱ گردید. همچنین افزودن صفحات بالایی، پایینی و اضافه کردن ماده مذکور (حالت ۲-۳)، سبب بهبود میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده و کاهش زمان ذوب به میزان ۸۷/۳۴ و ۴۶/۷۲٪ نسبت به حالت ۱-۲ گردید. میزان افزایش انرژی ذخیره‌شده و کاهش زمان ذوب در نهایت با اضافه نمودن صفحات بالایی، پایینی و میانی و همچنین استفاده از ترکیب مذکور در حالت چندگانه (حالت ۳-۳) به ۱۵۸/۴۱ و ۶۱٪ نسبت به حالت ۱-۲ بهبود یافت.

فهرست علائم

علائم	تعریف
A_m	ثابت ناحیه خمیری
$g (ms^{-2})$	شتاب جاذبه
$h (Jkg^{-1})$	انتالپی محسوس
$h_{ref} (Jkg^{-1})$	انتالپی محسوس در دمای مرجع
$H (Jkg^{-1})$	انتالپی کل
$k (Wm^{-1}K^{-1})$	ضریب رسانندگی
$L_f (Jkg^{-1})$	گرمای نهان
$P (Pa)$	فشار
t	زمان
$T (K)$	دما
$T_{Liquidus} (K)$	دمای مایع شدن
$T_{ref} (K)$	دمای مرجع
$T_{Solidus} (K)$	دمای جامد شدن
$\vec{V} (m/s)$	بردار سرعت
$u (m/s)$	مؤلفه افقی سرعت
$v (m/s)$	مؤلفه عمودی سرعت
$x (m)$	محور افقی
$y (m)$	محور عمودی
$\beta (K^{-1})$	ضریب انبساط حرارتی
λ	کسر حجمی سیال
$\mu(kgm^{-1}s^{-1})$	گرانروی
$\rho_l (kgm^{-3})$	چگالی مایع
$\rho_s (kgm^{-3})$	چگالی جامد
$\rho_{ref} (kgm^{-3})$	چگالی در دمای مرجع

مراجع

- [1] Khanlari, A. Aytaç, İ. Tuncer, A.D. Variyenli, H.İ. Şahin, H.N. "Improving the performance of a PCM integrated solar air collector by adding porous fins over the bottom side of the absorber: A transient CFD study", *Journal of Energy Storage*, Vol. 90, p. 111847 2024, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111847>.
- [2] NematpourKeshteli, A. Iasiello, M. Langella, G. Bianco, N. "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*, Vol. 52, p. 102690, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102690>.
- [3] Abdulrahman, R.S. Ibrahim, F.A. Dakhil, S.F. "Development of paraffin wax as phase change material based latent heat storage in heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 150, pp. 193–199, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.149>.
- [4] Sharma, A. Tyagi, V.V. Chen, C.R. Buddhi, D. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318–345, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [5] Iranmanesh, A. Ghorbani, A. Farzan, H. "Numerical Study on the Effects of Step Fins on Improving the Performance of a Heat Storage Unit in the Presence of a Middle Plate and Porous Medium", *Energy Engineering and Management*, Vol. 14, pp. 70–87, 2025, <https://doi.org/10.22052/eem.2025.255727.1093>.
- [6] Laouer, A. Teggat, M. Tunçbilek, E. Arıcı, M. Hachani, L. Ismail, K.A.R. "Melting of hybrid nano-enhanced phase change material in an inclined finned rectangular cavity for cold energy storage", *Journal of Energy Storage*, Vol. 50, pp. 104185, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104185>.
- [7] Li, Z. Shahsavari, A. Al-Rashed, A.A.A.A. Talebizadehsardari, P. "Effect of porous medium and nanoparticles presences in a counter-current triple-tube composite porous/nano-PCM system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167, pp. 114777, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114777>.
- [8] Mahdi, J.M. Mohammed, H.I. Talebizadehsardari, P. "A new approach for employing multiple PCMs in the passive thermal management of photovoltaic modules", *Solar Energy*, Vol. 222, pp. 160–174, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.044>.
- [9] Aldoss, T.K. Rahman, M.M. "Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design", *Energy Conversion and Management*, Vol. 83, pp. 79–87, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.047>.
- [10] Peiró, G. Gasia, J. Miró, L. Cabeza, L.F. "Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage", *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 729–736, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.029>.
- [11] Ghosh, A.K. Halder, P. "Parametric study and performance evaluation of a multi-layered twin PCM-based vertical thermal energy storage system", *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 11, pp. 1520–1539, 2025, <https://doi.org/10.14744/thermal.0000991>.
- [12] Akbarzadeh, S. Dehghan, M. Ali, H.M. "Heat Transfer Augmentation Techniques for Phase Change Materials", *Phase Change Materials for Thermal Energy Management and Storage*, CRC Press, pp. 130–181, 2024.
- [13] Ezra, M. Kozak, Y. Dubovsky, V. Ziskind, G. "Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 315–329, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.040>.
- [14] Kareem, B.E. Adham, A.M. Yaqob, B.N. "Design and Optimization of Air to PCM Heat Exchanger Using CFD", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 48, pp. 12609–12623, 2023, <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07360-w>.
- [15] Al Siyabi, I. Khanna, S. Mallick, T. Sundaram, S. "Experimental and numerical study on the effect of multiple phase change materials thermal energy storage system", *Journal of Energy Storage*, Vol. 36, pp. 102226, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102226>.

- [16] Aviles, D. Zanetti, E. Mancin, S. Hooman, K. "Multi-layered thermal energy storage using phase change materials and molten salt for high-temperature waste heat recovery", Journal of Energy Storage, Vol. 163, pp. 121873, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.121873>.
- [17] Zhao, C.Y. Lu, W. Tian, Y. "Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)", Solar Energy, Vol. 84, pp. 1402–1412, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.022>.
- [18] Mahdi, J.M. Nsofor, E.C. "Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination", Applied Energy, Vol. 191, pp. 22–34, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.036>.
- [19] Zhang, P. Xiao, X. Meng, Z.N. Li, M. "Heat transfer characteristics of a molten-salt thermal energy storage unit with and without heat transfer enhancement", Applied Energy, Vol. 137, pp. 758–772, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.004>.
- [20] Huang, M.J. "The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, pp. 957–963, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.032>.