

Numerical Investigation of the Effect of Sinusoidal Middle Plate with Variable Wavelength on Enhancing the Melting Process of a Vertical Triple-Tube Heat Exchange Unit

Aghil Iranmanesh

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

Keywords:

phase change material
triple-tube heat exchanger
middle plate
sinusoidal plate with variable
wavelength
heat storage rate

Abstract: In this research, the effects of a sinusoidal middle plate with variable wavelength on the melting process of a vertical triple-tube heat storage unit were investigated. The middle enclosure was filled with the phase change material (PCM) while the heat transfer fluids (HTFs) passed through the inner and outer tubes. The enthalpy-porosity approach was applied in order to simulate the PCM phase change process, using ANSYS FLUENT 2020 R2 software. The flow regime was supposed to be laminar while the velocity and pressure fields were coupled using the SIMPLE approach. For the evaluation of the efficacy of the heat exchange unit with wavy middle plate, the outcomes of various scenarios were compared with those cases in the absence of the middle plate. Therefore, the performance of the thermal energy unit was assessed via comparing the liquid fraction and temperature contours as well as the melting times and heat storage values of various scenarios. The numerical results showed that the sinusoidal middle plate with variable wavelength decreased the melting time by 67.59%, while the heat storage rate increased by 200% compared with the cases in the absence of the middle plate.

Original Research Article

Paper History:

Received: 22/08/2023

Revise: 01/11/2023

Accepted: 01/11/2023

How to cite this article: Iranmanesh, A., "Numerical Investigation of the Effect of Sinusoidal Middle Plate with Variable Wavelength on Enhancing the Melting Process of a Vertical Triple-Tube Heat Exchange Unit", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, PP. 112-127, Autumn 2023. <https://doi.org/10.22052/eem.2023.253456.1032>

© 2023 University of Kashan Press.

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



Introduction

In this paper, the effects of the wavy middle plate with variable wavelength on intensifying the melting process of a triple-tube heat storage unit were numerically investigated. To pursue this objective, various scenarios were considered in the present study. Firstly, the efficacy of the applied numerical approach in predicting the

numerical results available in the literature was examined. Then, the influences of the sinusoidal middle plate on expediting the melting process of the thermal energy storage (TES) unit were evaluated. Various scenarios, having been considered in the present research, are shown in Table 1.

Table (1): Various Scenarios Considered in the Present Research

	Minimum wavelength (mm)	Increment size (mm)
Case 1 (without the middle plate)	-	-
Case 2 (with wavy middle plate)	20.5	1
Case 3 (with wavy middle plate)	16	2
Case 4 (with wavy middle plate)	11.5	3
Case 5 (with wavy middle plate)	7	4

Materials and Methods

In the present research, the enthalpy-porosity methodology was applied in order to simulate the phase change process of the TES unit. Furthermore, the following assumptions were considered in the present study to simplify the simulation process:

1. In the simulation process, the liquid phase was modeled as Newtonian and incompressible liquid.
2. The viscous dissipation was ignored during the phase change process.
3. The problem was simulated as the 2D axisymmetric due to the symmetry that existed in the problem geometry.
4. The expansion effects were ignored during the phase change process.
5. The regime of the flow was supposed to be laminar.
6. The Boussinesq approximation was applied to predict the liquid density.

Results

In this section, the effects of various parameters, namely wavelength and the amplitude of the middle plate, the temperature, and the Re number of the inlet flow on the thermal performance of the TES were studied.

Firstly, the effects of the sinusoidal wavy middle plate with variable wavelength on improving the thermal performance of the TES unit was studied via comparing the liquid fraction and temperature contours of various cases with those cases in the absence of the middle plate. The numerical outcomes showed that the middle plate influence on enhancing the melting process of the TES unit was minor upto $t=600s$, while its role in expediting the PCM melting process become prominent afterwards. Based on the obtained numerical data, the sinusoidal middle plate with variable wavelength can considerably shorten the melting time, especially in case 3. However, increasing the aggregation of the waves near the bottom of the TES unit can worsen the thermal performance of the TES unit compared with case 3. At $t=3900 s$, 99.49 and 99.04% of the PCM converted to liquid in cases 3 and 5, respectively. The temperature contours showed that the PCM temperature was not homogenous in case 1, while adding a wavy middle plate caused the temperature contours to become homogenous. On the whole, the best thermal

performance was observed in case 3 (with amplitude of 5 mm) since the melting time increased by 67.59% compared with case 1.

Next, the influence of the wave amplitude on improving the performance of the TES unit was studied. Various amplitudes of 2.5, 5, 7.5, and 10 mm were considered in the study. Although increasing the wave amplitude could improve the thermal performance of the unit via increasing the heat transfer area, the thermal performance of the TES unit was the best for the case with amplitude of 5 mm. In other words, the thermal characteristics of the TES unit deteriorated for amplitude values higher than 5 mm. It could be due to hindering the natural convection generated within the unit.

As the last step, the influences of the temperature, of the Re number of the inlet flow, as well as of the PCM type on the melting process of the TES unit were examined. Based on the simulation data obtained, increasing the temperature and the Re number of the inlet flow could considerably enhance the thermal performance of the unit.

Discussion and Conclusion

In this research, the efficacy of the sinusoidal middle plate with variable wavelength on enhancing the melting process of the TES unit was numerically studied. To pursue this goal, the influence of wavelength and amplitude of the wave, temperature, and the Re number of the inlet flow on the PCM phase change process were analyzed. The numerical results showed that increasing the wave aggregation near the bottom part of the TES unit could considerably improve the thermal characteristic of the unit, especially in case 3. It was concluded that the melting time decreased by 67.59%, while the heat storage unit increased by 200% compared with the case in the absence of the middle plate. It was also deduced that although the thermal performance of the unit could be enhanced by increasing the wave aggregation via increasing the natural convection, the higher wave aggregation worsened the TES performance. Finally, the effects of the PCM type on the phase change process of the thermal energy storage unit were studied. The numerical results showed that the unit with RT-35, as the PCM, exhibited the best thermal performance compared with those of the units with RT-35HC and n-eicosane, as the PCM.

بررسی عددی تأثیر صفحه میانی سینوسی با طول موج متغیر بر بهبود فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم

عقیل ایرانمنش

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

iranmanesh.aghil@ujiroft.ac.ir

واژه‌های کلیدی:	چکیده: در این پژوهش، به بررسی تأثیر صفحه میانی با طول موج متغیر بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم پرداخته می شود.
مواد تغییر فاز دهنده	محفظه میانی مبدل حرارتی از ماده تغییر فاز دهنده پر شده است و
مبدل حرارتی سه لوله ای	آرایش سیال داغ ورودی غیر همسوسست. در پروژۀ حاضر از روش
صفحه میانی	انتالپی-تخلخل ارائه شده در نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۲۰ نسخه R2
صفحه سینوسی با طول موج متغیر	برای مدل سازی فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره حرارتی استفاده شده
نرخ ذخیره حرارتی	است. همچنین رژیم جریان آرام فرض شده و میدان سرعت و فشار با
	استفاده از الگوریتم سیمپل کویل شده اند. برای ارزیابی عددی میزان
	توانایی صفحه میانی سینوسی با طول موج متغیر در بهبود فرایند تغییر
	فاز مبدل حرارتی سه لوله ای، نتایج عددی حاصل از حالت های مختلف
	با طول موج ها و دامنه های گوناگون با نتایج عددی حالت بدون صفحه
	میانی مقایسه شده اند. بدین منظور عملکرد سیستم ذخیره حرارتی با
	مقایسه توزیع های کسر حجمی سیال و دمای ماده تغییر فاز دهنده، نرخ
	ذخیره حرارتی و زمان ذوب حالت های مختلف ارزیابی شده است.
	نتایج شبیه سازی عددی نشان می دهند که در حضور صفحه میانی
	سینوسی با طول موج متغیر، دمای ذوب و انرژی حرارتی ذخیره شده
	به میزان ۶۷/۵۹ و ۲۰۰ درصد نسبت به حالت در غیاب صفحه میانی
	به ترتیب کاهش و افزایش می یابند.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

۱. مقدمه

یکی از راهکارهای اساسی برای کاهش چالش‌های زیست‌محیطی و استفاده از انرژی‌های اتلافی، به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی است [۱]. سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی در مقیاس نسبتاً بزرگ عمدتاً در نیروگاه‌های مختلف خورشیدی و زمین‌گرمایی به‌منظور ذخیره‌ انرژی حرارتی و در نهایت، تولید برق استفاده می‌شوند [۲]. سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی همچنین در مقیاس کوچک خانگی برای ذخیره‌ انرژی خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی و همچنین کلکتورها و صفحات خورشیدی کاربرد دارند [۳]. سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی نهان به‌علت قابلیت بیشتر ذخیره‌ انرژی حرارتی در مقایسه با سایر سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی دارای کاربردهای صنعتی بیشتری هستند [۴]. از دیگر مزایای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی نهان، قابلیت این‌گونه سیستم‌ها در ذخیره‌ حرارتی در دمای نسبتاً ثابت است که مزیت مهمی در کاربردهای گوناگون از جمله تهویه مطبوع فضا محسوب می‌شود. از معایب استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی می‌توان به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی این‌گونه مواد اشاره کرد [۵]. تاکنون روش‌های زیادی برای جبران ضریب هدایت حرارتی نسبتاً پایین مواد تغییر فازدهنده پیشنهاد شده است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، استفاده از اصلاح هندسه به‌دلیل تغییر نیافتن حجم مواد تغییر فازدهنده (در حالت استفاده از فوم فلزی) و همچنین عدم کاهش ظرفیت گرمای نهان (در حالت استفاده از نانوذرات) نسبت به روش‌های استفاده از فوم فلزی و نانوذرات مورد توجه بیشتری است [۶].

با توجه به کاربرد بسیار گسترده مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف و نیروگاه‌ها، تاکنون تحقیقات بسیار گسترده‌ای برای بهبود عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی صورت گرفته است. آگنیم و همکاران [۷] عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی دولوله‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش تعداد لوله‌های مبدل، سبب افزایش دمای مواد تغییر فازدهنده می‌شود. درزی و همکاران [۸] تغییر زمان ذوب ماده تغییر فازدهنده را در حالت استوانه‌های متحدالمرکز و مختلف‌المرکز مطالعه کردند. آن‌ها این‌گونه نتیجه‌گیری کردند که به‌دلیل وجود اثرات جابه‌جایی طبیعی، دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده به‌شدت متأثر از موقعیت استوانه داخلی بود. سطوح موج‌دار طبق تحقیقات صورت‌گرفته می‌توانند بدون

تغییر در جرم ماده تغییر فازدهنده و از طریق افزایش سطح انتقال حرارت سبب بهبود فرایند تغییر فاز شوند [۹]. عبدالله‌زاده و اسماعیلی‌پور [۱۰] تأثیر دو دیواره موج‌دار واگرا-همگرا و همگرا-واگرا را در حضور نانوسیال آب-مس بر فرایند انجماد بررسی کردند. آن‌ها در پژوهش انجام‌شده تأثیر منفی حضور نانوذرات را به‌علت پایین بودن میزان گرمای نهان آن‌ها و همچنین تأثیر مثبت سطح موج‌دار گزارش کردند. شهسوار و همکاران [۱۱] به مطالعه تأثیر دیواره موج‌دار بر بهبود فرایند تغییر فاز یک مبدل حرارتی دولوله‌ای در حضور محیط متخلخل پرداختند. با توجه به نتایج گزارش‌شده، زمان ذوب و انجماد مبدل حرارتی با دیواره موج‌دار بیش از ۹۰ درصد نسبت به مبدل حرارتی با دیواره مسطح کاهش یافت. شهسوار و همکاران [۱۲] به بررسی عددی تأثیر دیواره موج‌دار با طول موج متغیر بر فرایند تغییر فاز یک مبدل حرارتی دولوله‌ای پرداختند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش عددی، زمان ذوب و انجماد در حالت دیواره موج‌دار نسبت به حالت دیواره مستقیم به‌ترتیب ۷۰/۸ و ۴۲/۸ درصد کاهش یافت. همچنین شهسوار و همکاران [۱۳] تأثیر دیواره موج‌دار سینوسی با طول موج متغیر را بر بهبود فرایند ذوب و انجماد یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم بررسی کردند. با توجه به نتایج عددی به‌دست‌آمده، نرخ ذخیره و آزاد شدن انرژی در حالت بهینه نسبت به حالت مبدل حرارتی با دیواره مسطح به‌ترتیب به‌میزان ۱۰۰ و ۹۹ درصد افزایش یافت.

شهسوار و همکاران [۱۴] در یک پژوهش دیگر، به تحلیل انرژی و فرایند ذوب و انجماد یک سیستم ذخیره‌ حرارتی پرداختند. سیستم مورد بررسی بر اساس دما، کسر حجمی سیال، سرعت ماده تغییر فازدهنده و نرخ تولید انرژی حرارتی اصطکاکی ارزیابی شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نرخ تولید انرژی حرارتی از نرخ تولید انرژی اصطکاکی در حین فرایند تغییر فاز بزرگ‌تر است. عیسی‌پور و همکاران [۱۵] به شبیه‌سازی عددی فرایند انجماد یک مبدل حرارتی بیضوی با دیواره داخلی موج‌دار پرداختند. برای بهبود خواص ماده تغییر فازدهنده نانوذرات سیلیسیم کاربرد به آن اضافه شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کاهش دمای سیال گذرنده از مبدل حرارتی از ۲۸۵ به ۲۸۰ کلوین سبب کاهش زمان انجماد از ۴۸ به ۳۹ دقیقه شد. شبیه‌سازی عددی فرایند تغییر فاز یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای و در حضور نانوذرات توسط بوجلبن و همکاران [۱۶] انجام شد. با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده حالت بهینه مبدل حرارتی با مقایسه

رینولدز و افزایش دمای آب گرم ورودی به مبدل حرارتی و همچنین نوع ماده تغییر فزادنده بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره حرارتی بررسی خواهد شد.

۲. شرح مختصری از سیستم ذخیره حرارتی مورد

مطالعه

در پژوهش حاضر، تأثیر صفحه میانی موج سینوسی با طول موج متغیر بر بهبود فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم بررسی می شود. برای بهبود فرایند انتقال حرارت از سیال گذرنده داغ مبدل حرارتی به ماده تغییر فزادنده، آرایش سیال گذرنده از مبدل حرارتی به صورت غیر همسو در نظر گرفته شده است. سیال گذرنده داغ از لوله داخلی مبدل حرارتی به سمت بالا جریان می یابد؛ در حالی که جهت جریان سیال داغ گذرنده از لوله خارجی مبدل حرارتی به سمت پایین است. با توجه به تقارن مسئله و برای تسریع فرایند شبیه سازی عددی، مسئله مورد مطالعه به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، صفحه مسطح میانی سبب بهبود فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی سه لوله قائم خواهد شد [۳ و ۱۷].

هدف اصلی مطالعه حاضر، تعیین بهترین مبدل حرارتی سه لوله ای قائم در حضور صفحه میانی موج سینوسی با طول موج متغیر است. بدین منظور حالت های مختلفی در پژوهش حاضر برای تعیین مبدل حرارتی سه لوله ای قائم با کمترین زمان ذوب و بیشترین نرخ ذخیره انرژی در نظر گرفته شده است. ضخامت صفحه میانی در پژوهش حاضر ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر، ابتدا تأثیر طول موج صفحه میانی بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای در نظر گرفته می شود. بعد از تعیین بهترین حالت بهینه، تأثیر دامنه موج سینوسی بر فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره حرارتی بررسی خواهد شد. در نهایت تأثیر دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی و نوع ماده تغییر فزادنده بر فرایند تغییر فاز سیستم بررسی خواهد شد. اطلاعات بیشتر در مورد حالت های مورد بررسی در پژوهش حاضر در جدول (۱) نشان داده شده است. شایان ذکر است که در تمامی شبیه سازی های انجام شده در این پژوهش به جز قسمت ۵.۶، ماده تغییر فزادنده RT-35 در نظر گرفته شده است [۲۰]. همچنین خواص فیزیکی مواد تغییر فزادنده مختلف و همچنین سیال داغ ورودی (آب) در جداول (۲) و (۳) ارائه شده اند [۲۱].

حالت های مختلف مشخص گردید. در قیاس با نانوذرات مختلف مورد بررسی در این پژوهش، آلومینیوم اکسید با حدود ۱۴٪ افزایش نرخ ذوب و نرخ ذخیره حرارتی دارای بهترین عملکرد حرارتی بود.

عیسی پور و همکاران [۱۷] یک طراحی مدرن برای بهبود انتقال حرارت هدایت و جابه جایی یک سیستم ذخیره حرارتی مناسب برای کاربردهای انرژی خورشیدی ارائه کردند. در پژوهش مذکور تأثیر دیواره موج با طول موج متغیر و همچنین شکل پیچشی دیواره به طور همزمان به منظور مشخص نمودن حالت بهینه به صورت عددی بررسی شد. با توجه به نتایج گزارش شده، زمان ذوب در حالت دیواره موج به میزان ۸۳٪ نسبت به حالت دیواره مسطح کاهش یافت. ایرانمنش [۱۸] با افزودن یک صفحه میانی مسطح، عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم را در حالت ذوب بهبود داد. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی، افزودن صفحه میانی زمان ذوب را نسبت به حالت بدون صفحه میانی تا میزان ۵۲/۶۲ درصد کاهش داد. همچنین نرخ ذخیره حرارتی در حضور صفحه میانی نسبت به حالت بدون صفحه میانی مسطح به میزان ۱۰۹/۹ درصد افزایش یافت. ایرانمنش [۱۹] ایده حضور صفحه میانی برای بهبود فرایند انجماد یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم را نیز بررسی کرد. با توجه به نتایج عددی به دست آمده از شبیه سازی عددی، به دلیل نقش اساسی صفحه مسطح میانی بر کاهش انتقال حرارت جابه جایی تأثیر صفحه مذکور بر بهبود فرایند انجماد مبدل حرارتی سه لوله ای قائم نسبت به فرایند ذوب آن بیشتر بود.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته توسط محققان، ایده حضور صفحه میانی سینوسی با طول موج متغیر بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم تاکنون بررسی نشده است. لذا در این پژوهش، تأثیر حضور صفحه میانی سینوسی با طول موج متغیر بر بهبود عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی سه لوله ای قائم بررسی خواهد شد. هدف اصلی این پژوهش تعیین مبدل حرارتی با کمترین زمان ذوب و بیشترین نرخ ذخیره انرژی است. در مطالعه حاضر، ۴ حالت موج سینوسی با طول موج متغیر برای صفحه میانی در نظر گرفته خواهد شد و نتایج عددی آن با حالت مبدل حرارتی بدون صفحه میانی مقایسه خواهد شد. همچنین در این پژوهش، توزیع های کسر حجمی سیال و دمای متوسط ماده تغییر فزادنده برای تجزیه و تحلیل بهتر نتایج عددی بررسی و مقایسه شده اند. بعد از تعیین بهترین حالت بهینه، تأثیر افزایش عدد

جدول (۱): حالت‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر

میزان گام (میلی متر)	کمترین طول موج (میلی متر)	
-	-	حالت ۱ (مبدل حرارتی در غیاب صفحه میانی)
۱	۲۰/۵	حالت ۲ (صفحه میانی موج با طول موج متغیر)
۲	۱۶	حالت ۳ (صفحه میانی موج با طول موج متغیر)
۳	۱۱/۵	حالت ۴ (صفحه میانی موج با طول موج متغیر)
۴	۷	حالت ۵ (صفحه میانی موج با طول موج متغیر)

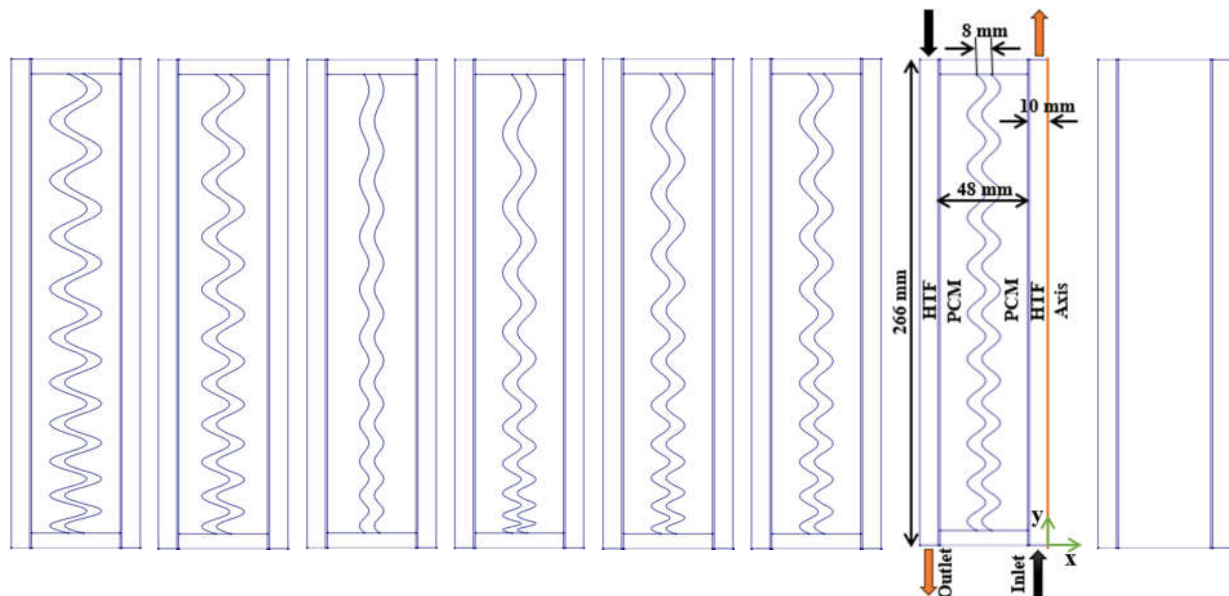
جدول (۲): خواص فیزیکی مواد تغییر فازدهنده مختلف مورد بررسی در این پژوهش

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	۱۷۰	۲/۰	۰/۲	۰/۰۲۳	۳۰۹/۲	۳۰۲/۲	۰/۰۰۰۶
RT-35HC	۷۷۰	۸۸۰	۲۴۰	۲/۰	۰/۲	۰/۰۰۴۴	۳۰۹	۳۰۷	۰/۰۰۰۶
n-eicosane	۷۸۰	۸۵۶	۲۴۷/۶	۲/۴۶	۰/۱۵۰۵	۰/۰۳۸۵	۳۱۰/۱۵	۳۰۸/۱۵	۰/۰۰۰۹

جدول (۳): خواص فیزیکی سیال (آب) داغ ورودی به مبدل حرارتی

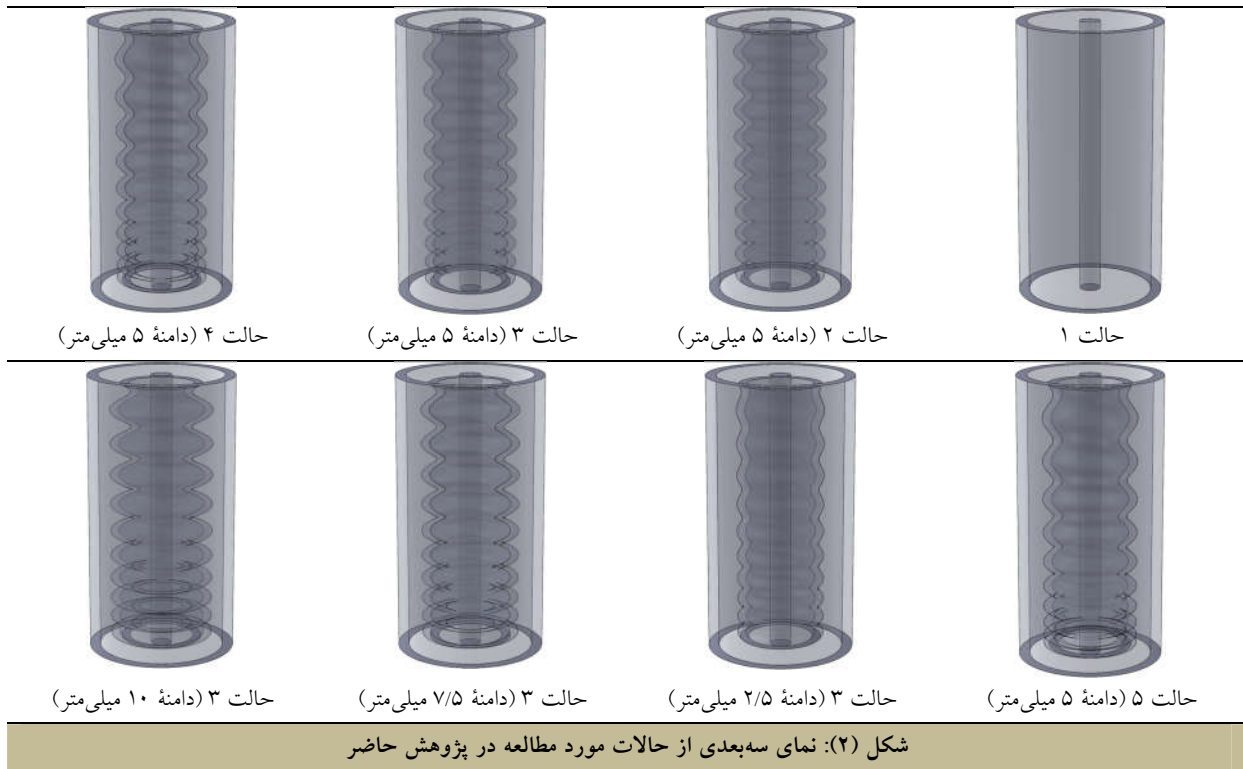
خواص	ρ [kg/m ³]	T [K]	C_p [kJ/kg.K]	k [W/m.K]	μ [N.s/m ²]
آب	۹۸۷	۳۲۳/۲	۴/۰۶۶	۰/۶۴۳۹	۰/۰۰۰۵۳۱

نمای دوبعدی و سه‌بعدی از حالات مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند.



حالت ۱
حالت ۲ (دامنه ۵ میلی متر)
حالت ۳ (دامنه ۵ میلی متر)
حالت ۴ (دامنه ۵ میلی متر)
حالت ۵ (دامنه ۵ میلی متر)
حالت ۳ (دامنه ۲/۵ میلی متر)
حالت ۳ (دامنه ۷/۵ میلی متر)
حالت ۳ (دامنه ۱۰ میلی متر)

شکل (۱): نمای دوبعدی از حالات مورد مطالعه در پژوهش حاضر



است.

شایان ذکر است که با توجه به اینکه محفظه مبدل حرارتی مورد مطالعه در شبیه سازی به طور کامل از ماده تغییر فازدهنده پر شده است، حجم ماده تغییر فازدهنده حین فرایند تغییر فاز به دلیل عدم وجود حفره هوا ثابت خواهد بود. بنابراین در شبیه سازی حاضر از اثرات انبساطی حین فرایند تغییر فاز صرف نظر شده است [۲۳]. فرایند تغییر فاز ماده تغییر دهنده با استفاده از روش انتالپی-تخلخل ارائه شده توسط برنت و همکاران [۲۴] و معادلات زیر مدل سازی شده است:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتوم:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu (\nabla^2 \vec{V}) - \rho_{ref} \beta (T - T_{ref}) \vec{g} - \vec{S} \quad (2)$$

که جمله \vec{S} با استفاده از رابطه (۳) به دست می آید:

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

گفتنی است که فشار و دمای به کاررفته در تقریب بوزینسک

به ترتیب با نماد P و T نشان داده شده اند. میزان ثابت ناحیه

خمیری (A_m) برابر با 10^5 در نظر گرفته شده است. همچنین Λ

۳. معادلات حاکم بر مسئله

در این پژوهش، برای شبیه سازی فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده از روش انتالپی-تخلخل استفاده شده است. میدان سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل^۱ کوپل شده و معادلات فشار با استفاده از روش پرستو^۲ و معادلات مومنتوم و انرژی با استفاده از روش کوئیک^۳ گسسته سازی شده اند. همچنین شرایط زیر برای مدل سازی فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده در نظر گرفته شده اند:

- در شبیه سازی عددی، فاز مایع به صورت سیال نیوتنی غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده است.

- با توجه به وجود سرعت های بسیار کم، از اثرات اتلافات لزجی در فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده صرف نظر شده است [۱۹].

- به دلیل تقارن موجود در مسئله، شبیه سازی عددی با شرط تقارن محوری دوبعدی مدل سازی شده است.
- از اثرات انبساطی ماده تغییر فازدهنده در طی فرایند تغییر فاز صرف نظر شده است [۲۲].

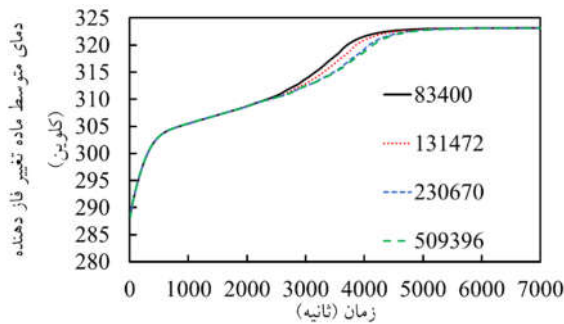
- رژیم جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است.
- برای تخمین چگالی از تقریب بوزینسک^۴ استفاده شده

1. SIMLPE
2. PRESTO
3. QUICK
4. Boussinesq

در این پژوهش شرایط اولیه برای فشار نسبی، سرعت‌ها، دمای اولیه و کسر حجمی ماده تغییر فازدهنده به ترتیب برابر با ۰، ۰، ۲۸۸/۲ کلون و ۰ در نظر گرفته شده است.

۵. استقلال از شبکه و اعتبارسنجی حل عددی

در پروژه حاضر از نرم‌افزار انسیس فلونت ۲۰۲۰ نسخه R2 برای شبیه‌سازی عددی فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره حرارتی استفاده شده است. برای به دست آوردن نتایج عددی قابل اطمینان، معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتوم 10^{-4} و برای معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده‌اند. گام زمانی در شبیه‌سازی ثابت فرض گردیده و تعداد تکرار در هر گام زمانی برابر با ۲۰۰ فرض شده است. در گام اول برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج عددی به شبکه، بایستی مطالعه استقلال از شبکه انجام گیرد. نتایج استقلال از شبکه مطالعه حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نتایج استقلال از شبکه برای دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده

با توجه به شکل (۳)، دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده برای تعداد المان ۲۳۰۶۷۰ مستقل از شبکه است. برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج حل عددی به گام زمانی، آنالیز مشابهی برای گام‌های زمانی ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ انجام گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده و تأثیر بسیار ناچیز گام زمانی بر نتایج، میزان گام زمانی برای مدل‌سازی ۰/۲ در نظر گرفته شد.

برای ارزیابی دقت روش حل عددی به کاررفته، نتایج حل عددی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج عددی و آزمایشگاهی مت و همکاران [۲۵] در شکل (۴) مقایسه شده‌اند.

با توجه به شکل (۴)، تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مت و همکاران [۲۵] و نتایج عددی شبیه‌سازی پروژه حاضر مشاهده شد.

نشان‌دهنده کسر حجمی سیال ماده تغییر فازدهنده است.

معادله انرژی:

$$\frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} + \nabla(\rho C_p \vec{V} T) = \nabla(k \nabla T) - S_L \quad (4)$$

که S_L از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$S_L = \frac{\partial \rho \Lambda L_f}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \Lambda L_f) \quad (5)$$

برای محاسبه میزان انتالپی کل از رابطه (۶) استفاده شده است:

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

که h از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (7)$$

۴. شرایط مرزی و اولیه

شکل (۱) نمایی دوبعدی از مسئله مورد تحلیل در این پژوهش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱) و تقارن موجود در مسئله، شرط مرزی تقارن محوری^۱ برای ضلع سمت راست مبدل حرارتی در نظر گرفته شده که عبارت است از:

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین شرط مرزی ضلع سمت چپ، بالا و پایین به جز نواحی ورودی و خروجی جریان سیال داغ، آدیاباتیک و دیواره فرض شده‌اند که عبارت است:

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

$$\vec{V} = 0 \rightarrow u = 0, v = 0 \quad (10) \text{ دیواره افقی}$$

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

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

شرط مرزی برای ناحیه ورودی سیال داغ، ورودی سرعت^۲ (براساس عدد رینولدز ۱۰۰۰)، و برای ناحیه خروجی سیال داغ، شرط مرزی فشار خروجی^۳ در نظر گرفته شده است:

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

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

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

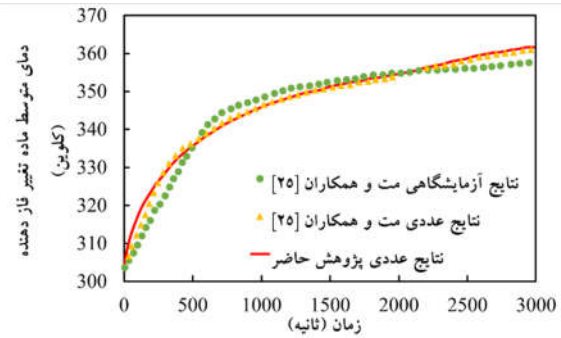
$$\vec{V} = 0\vec{i} - 0.0268997\vec{j} \quad \text{خارجی}$$

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

داخلی و خارجی

1. Axis
2. Velocity inlet
3. Pressure outlet

ورودی برابر با ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دمای اولیه ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۵)، تا زمان ۶۰۰ ثانیه تأثیر صفحه میانی موج بر کسر حجمی سیال ناچیز است. با گذر زمان و افزایش انتقال حرارت از طریق صفحه میانی، نقش صفحه میانی بر فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی بسیار پررنگ‌تر می‌شود. در حالت ۱ (در غیاب صفحه میانی)، تغییر فاز لبه بیرونی مبدل حرارتی با توجه به سطح بزرگ‌تر انتقال حرارت نسبت به لبه داخلی مبدل حرارتی بیشتر است. همچنین با توجه به وجود انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده در قسمت بالایی مبدل حرارتی بسیار وسیع‌تر از لبه پایینی مبدل حرارتی است. در زمان ۴۵۰۰ ثانیه، تنها ۶۱/۴ درصد ماده تغییر فازدهنده، تغییر فاز داده است. افزودن دو صفحه مسطح در لبه پایینی و بالایی مبدل حرارتی و یک صفحه میانی موج می‌تواند به‌طور چشمگیری فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی را بهبود بخشد. همچنین تأثیر طول موج متغیر صفحه موج بر بهبود فرایند ذوب مبدل حرارتی کاملاً مشهود است. با توجه به شکل (۵) افزایش تراکم موج سینوسی در لبه پایینی مبدل حرارتی به‌طور چشمگیری می‌تواند سبب بهبود فرایند ذوب به‌ویژه در حالت ۳ شود. با توجه به شکل (۵)، افزایش بیش از حد تراکم موج سینوسی صفحه موج سبب بدتر شدن فرایند ذوب نسبت به حالت ۳ خواهد شد. در زمان ۳۹۰۰ ثانیه، ۹۹/۴۹ درصد ماده تغییر فازدهنده در حالت ۳ تبدیل به مایع شده است؛ درحالی‌که در حالت ۵، ۹۹/۰۴ درصد ماده تغییر فازدهنده دچار تغییر فاز شده است. شایان ذکر است که میزان کسر حجمی سیال در حالت ۱ و در زمان ۳۹۰۰ ثانیه ۵۴/۹۴ است و کسر حجمی سیال در حالت ۳ نسبت به کسر حجمی سیال در حالت ۱ به‌میزان ۸۱/۰۹ درصد افزایش می‌یابد.



شکل (۴): مقایسه نتایج عددی پروژه حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی مت و همکاران [۲۵]

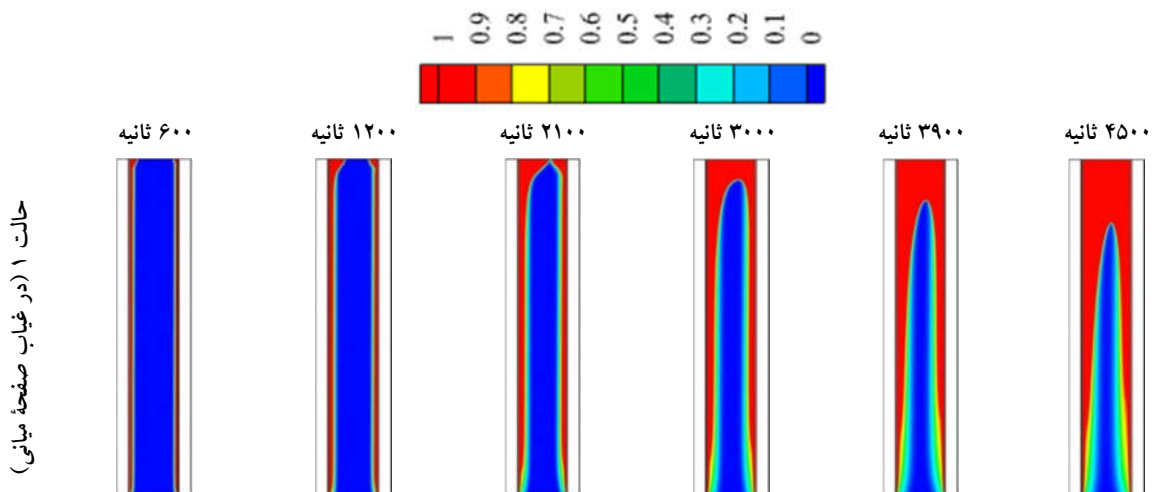
۶. نتایج و بحث

در این قسمت تأثیر عوامل مختلف از جمله طول موج و دامنه صفحه میانی موج، دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی و نوع ماده تغییر فازدهنده بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم بررسی خواهد شد. برای سهولت مقایسه کمی و کیفی حالات مختلف، در تمامی حالات مورد بررسی به‌استثنای قسمت ۵.۶، جرم ماده تغییر فازدهنده یکسان است.

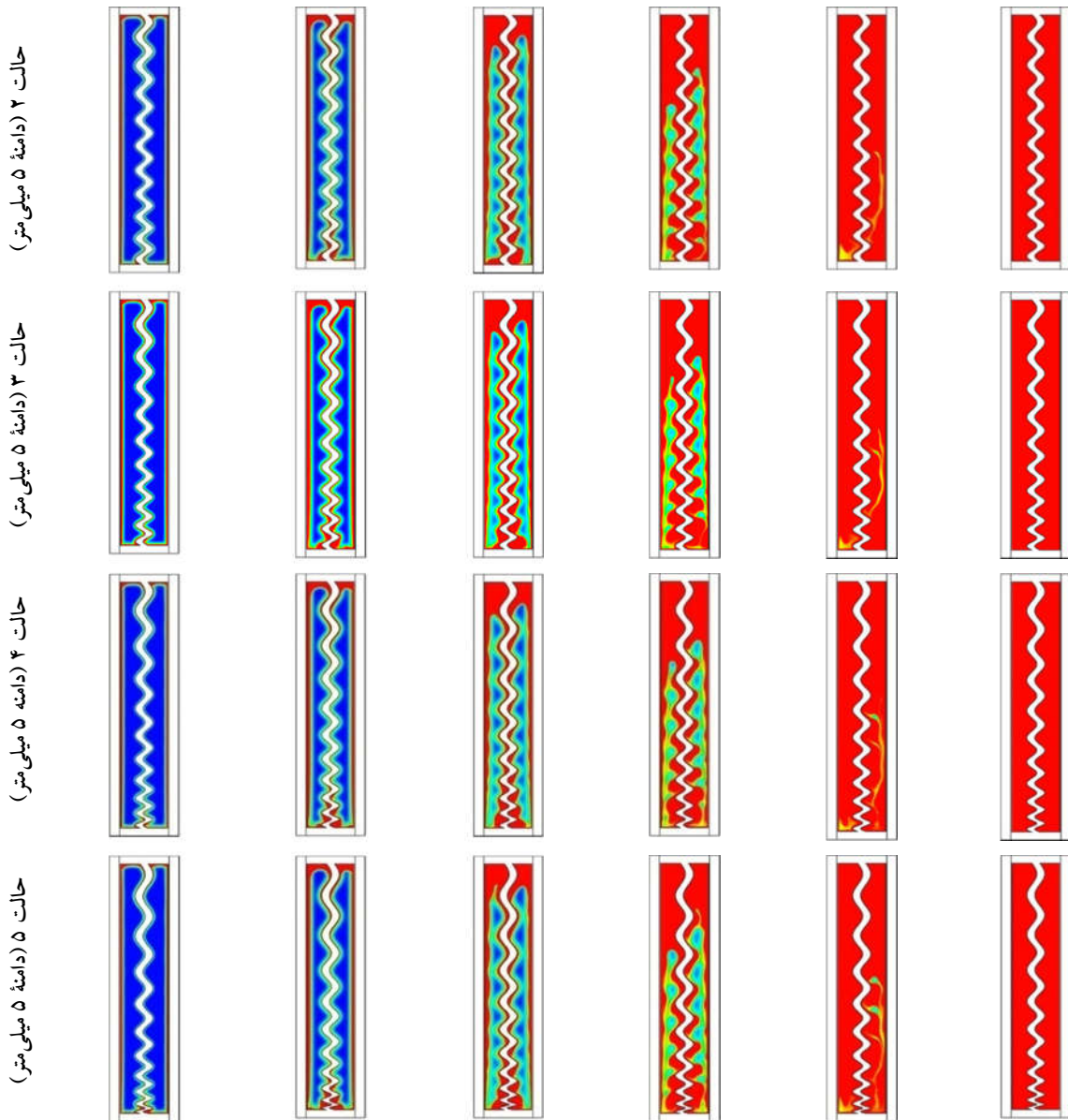
۱.۶. تأثیر طول موج صفحه میانی موج بر فرایند ذوب

مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم

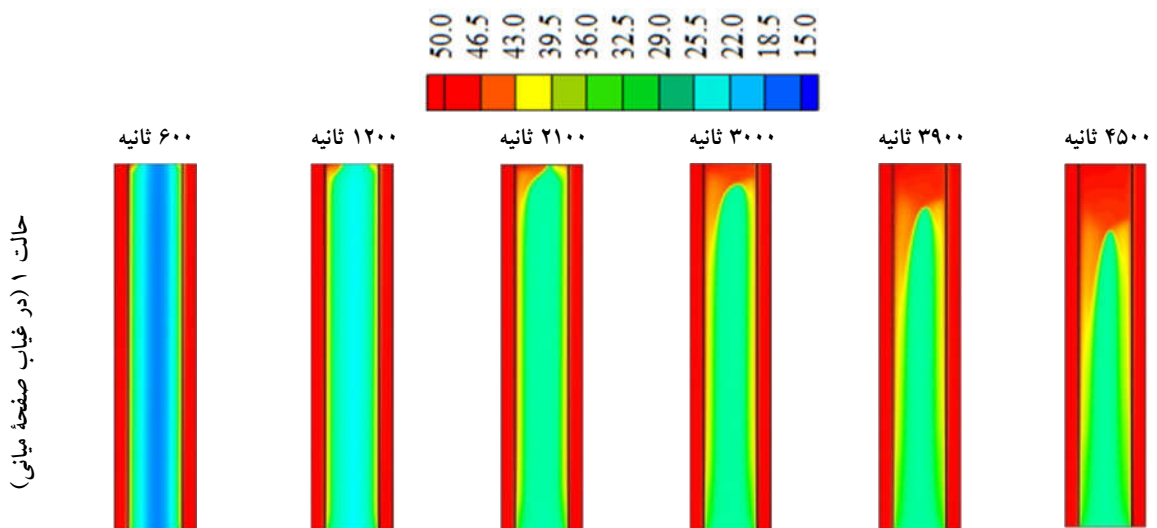
به‌منظور بررسی دقیق تأثیر طول موج صفحه میانی موج بر فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم، توزیع کسر حجمی سیال و دمای ماده تغییر فازدهنده برای حالت‌های مختلف مورد بررسی در زمان‌های مختلف در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. عدد رینولدز در تمامی حالت‌های مورد بررسی به‌استثنای قسمت ۴.۶ برابر با ۱۰۰۰ فرض شده است. همچنین دامنه موج در تمامی حالات مورد مطالعه در قسمت ۱.۶، ۵ میلی‌متر است. دمای آب داغ

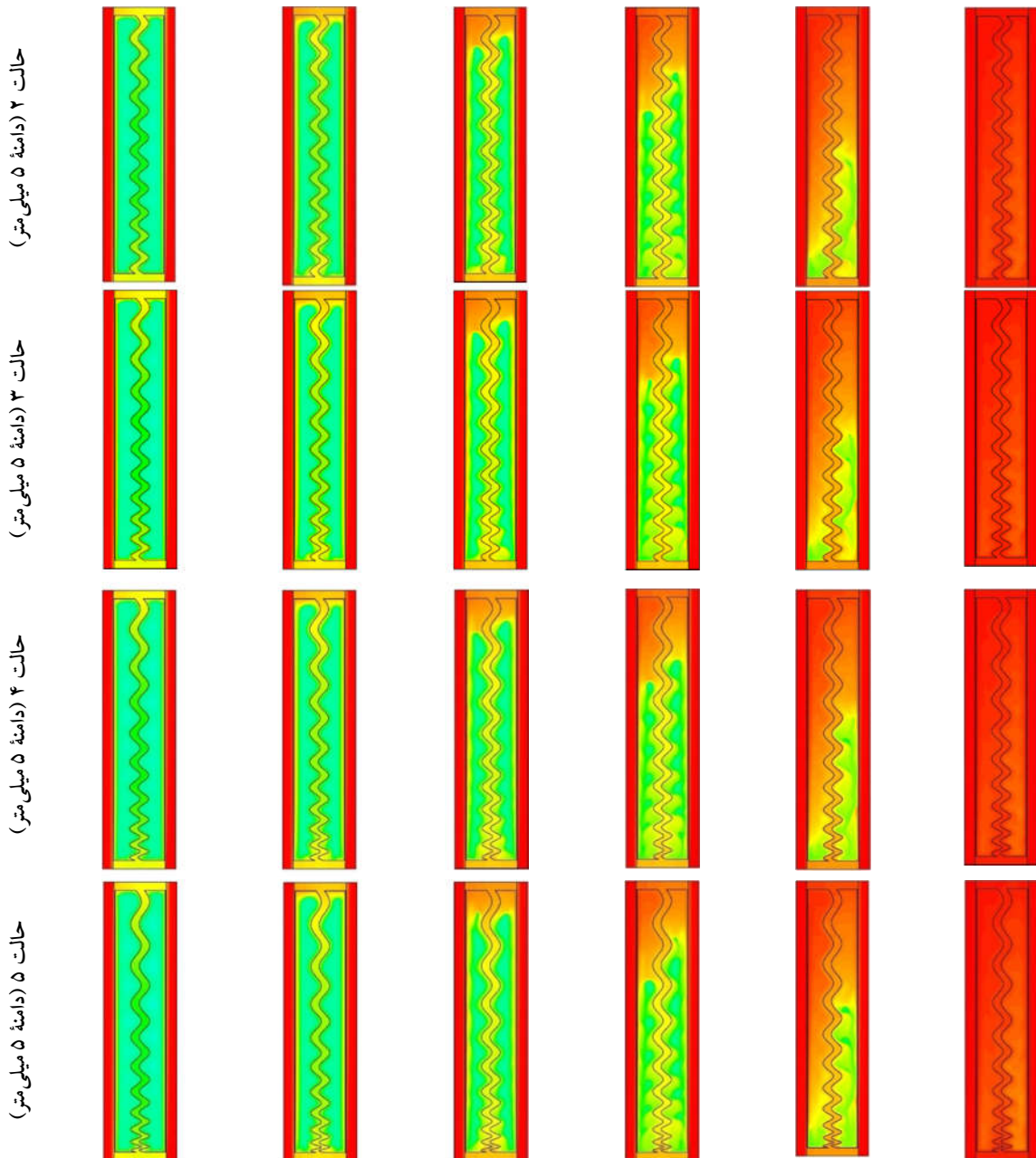


حالت ۱ (در غیاب صفحه میانی)



شکل (۵): توزیع کسر حجمی سیال برای فرایند ذوب حالت‌های در نظر گرفته در این پژوهش در زمان‌های مختلف





شکل (۶): توزیع دمای سیال برای فرایند ذوب حالت‌های در نظر گرفته در این پژوهش در زمان‌های مختلف

مختلف مورد بررسی در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۶)، در غیاب صفحه میانی توزیع دمای مبدل حرارتی حالت ۱ نسبت به سایر حالات بسیار ناهمگن است. افزودن صفحه میانی موج و دو صفحه مسطح بالایی و پایینی سبب متعادل‌تر شدن توزیع دما در مبدل حرارتی خواهد شد. در تمامی حالات مورد بررسی، با گذر زمان میزان انتقال حرارت از طریق صفحه میانی افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه، افزودن تراکم موج در لبه پایینی مبدل حرارتی سبب بهبود فرایند ذوب مبدل حرارتی از طریق افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی می‌شود. این پدیده در حالت ۳ و در زمان ۳۹۰۰ ثانیه کاملاً مشهود است. در حالات ۲، ۳، ۴ و ۵، دما در لبه پایینی محفظه داخلی مبدل حرارتی به دلیل

شایان است که در تمامی حالات مورد بررسی به‌جز حالت ۱، در زمان ۴۵۰۰ ثانیه ۱۰۰ درصد ماده تغییر فازدهنده به مایع تبدیل شده است. همچنین در حضور صفحه میانی، با توجه به سطح بزرگ‌تر انتقال حرارت، حجم ماده تغییر فازدهنده تبدیل شده به مایع در محفظه داخلی مبدل حرارتی به نسبت محفظه خارجی مبدل حرارتی بیشتر است. با مقایسه کمی حالت‌های مورد بررسی، با توجه به اینکه حالت ۳ دارای بیشترین نرخ افزایش کسر حجمی سیال در زمان ۳۹۰۰ ثانیه است، حالت مذکور (حالت ۳) دارای بهترین عملکرد حرارتی است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر صفحه میانی موج با طول موج متغیر بر فرایند ذوب ماده تغییر فازدهنده، توزیع دمای حالات

نبود انتقال حرارت طبیعی و داشتن کمترین سطح تبادل حرارتی، ذخیره‌شده برای حالات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ (دامنه موج برابر با ۵ کمترین مقدار است. مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی (میلی‌متر) در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

جدول (۴): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در حالت‌های مختلف

حالت مورد بررسی	زمان ذوب (ثانیه)	میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده (وات)
حالت ۱ (مبدل حرارتی در غیاب صفحه میانی)	۱۲۵۰۲	۳۱/۰۶
حالت ۲ (دامنه ۵ میلی‌متر)	۴۰۸۶	۹۲/۵۵
حالت ۳ (دامنه ۵ میلی‌متر)	۴۰۵۲	۹۳/۱۸
حالت ۴ (دامنه ۵ میلی‌متر)	۴۱۶۰	۹۱/۱۷
حالت ۵ (دامنه ۵ میلی‌متر)	۴۲۲۵	۸۹/۷۷

حالات مورد مطالعه در این قسمت برابر با ۱۰۰۰ فرض شده، درحالی‌که دامنه موج صفحه میانی برابر با ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی ذخیره‌شده برای حالت ۳ و در دامنه‌های موج ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده

حالت ۳ در دامنه‌های موج مختلف

حالت مورد بررسی	زمان ذوب (ثانیه)	میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده (وات)
حالت ۳ (دامنه ۲/۵ میلی‌متر)	۴۵۴۱	۸۴/۵۳
حالت ۳ (دامنه ۵ میلی‌متر)	۴۰۵۲	۹۳/۱۸
حالت ۳ (دامنه ۷/۵ میلی‌متر)	۴۲۴۸	۸۹/۲۵
حالت ۳ (دامنه ۱۰ میلی‌متر)	۴۶۰۳	۸۲/۲۶

با توجه به جدول (۵)، زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده برای دامنه موج ۲/۵ میلی‌متر نسبت به حالت با دامنه موج ۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۲/۰۷ درصد افزایش و ۹/۲۸ درصد کاهش می‌یابد. کاهش سطح مفید تبادل حرارت می‌تواند منجر به بدتر شدن فرایند ذوب مبدل حرارتی قائم شود. همچنین افزایش دامنه موج صفحه میانی (دامنه ۱۰ میلی‌متر) سبب افزایش زمان ذوب و کاهش میزان ذخیره انرژی حرارتی به میزان ۱۳/۶ و ۱۱/۷۲ درصد خواهد شد. دلیل بدتر شدن فرایند تغییر فاز در نتیجه افزایش دامنه موج را می‌توان به اثرات انسدادی موج و در نتیجه کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نسبت داد. میزان افزایش زمان ذوب حالات ۳ با دامنه ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر نسبت به زمان ذوب حالت ۳ با دامنه ۵ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۱۲/۰۷، ۴/۸۴ و ۱۳/۶۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین کاهش میزان نرخ انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالات ۳ با دامنه ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر نسبت به حالت ۳ با دامنه ۵ میلی‌متر به ترتیب ۹/۲۸، ۴/۲۲ و ۱۱/۷۲ درصد است. با توجه به داده‌های ارائه‌شده، فرایند تغییر فاز برای حالت ۳ با دامنه موج ۵ میلی‌متر بهینه است.

با توجه به داده‌های جدول (۴)، وجود صفحه میانی موج با دامنه موج ۵ میلی‌متر (حالت ۳) سبب کاهش قابل توجه زمان ذوب و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده می‌گردد. میزان کاهش دمای ذوب و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالت ۳ نسبت به حالت ۱ به ترتیب برابر با ۶۷/۵۹ و ۲۰۰ درصد است. شایان ذکر است که میزان کاهش زمان ذوب حالات ۲، ۴ و ۵ نسبت به حالت ۱ به ترتیب برابر با ۶۷/۳۲، ۶۶/۷۳ و ۶۶/۲۱ درصد است. اگرچه افزایش تراکم موج صفحه میانی تا حدودی سبب کاهش زمان ذوب و افزایش میزان انرژی ذخیره‌شده از طریق افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد می‌شود، تراکم بیش از حد موج صفحه میانی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی مورد بررسی داشته باشد. برای مثال طبق داده‌های ارائه‌شده در جدول (۴)، میزان افزایش انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالت ۵ نسبت به حالت ۱، برابر با ۱۸۹/۰۲ درصد است. از یک‌سو، تراکم بیش از حد موج صفحه میانی می‌تواند سبب کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی گردیده و در نهایت، سبب افزایش زمان ذوب و کاهش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده گردد. از سوی دیگر، افزایش تراکم بیش از حد موج صفحه میانی در لبه پایینی مبدل حرارتی، سبب کاهش سطح مفید انتقال حرارتی در لبه بالایی مبدل حرارتی گردیده که همین موضوع در نهایت سبب بدتر شدن عملکرد حرارتی سیستم ذخیره مورد مطالعه خواهد گردید. با مقایسه کمی و کیفی نتایج عددی به دست آمده، حالت ۳ با دامنه ۵ میلی‌متر نسبت به سایر حالات مورد بررسی در قسمت ۱.۶ دارای عملکرد حرارتی بهتری است.

۲.۶. تأثیر دامنه موج صفحه میانی موج بر فرایند

ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم

در قسمت ۲.۶، تأثیر دامنه موج صفحه میانی بر بهبود عملکرد سیستم ذخیره حرارتی بررسی خواهد شد. عدد رینولدز در تمامی

۳.۶. تأثیر دمای سیال داغ ورودی بر فرایند ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم

در این قسمت تأثیر دمای سیال داغ ورودی به مبدل حرارتی بر بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌ی حرارتی مورد مطالعه بررسی خواهد شد. بدین منظور دمای سیال داغ ورودی به مبدل حرارتی ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته خواهد شد. در جدول (۶) زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده برای سه دمای ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. در تمامی حالات مورد بررسی در این قسمت، عدد رینولدز و دامنه موج به ترتیب ۱۰۰۰ و ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

جدول (۶): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالت ۳ در دماهای مختلف سیال داغ ورودی		
حالت مورد بررسی	زمان ذوب (ثانیه)	میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده (وات)
حالت ۳ (دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد)	۵۵۲۷	۶۶/۴
حالت ۳ (دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد)	۴۰۵۲	۹۳/۱۸
حالت ۳ (دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد)	۳۲۹۳	۱۱۸/۴۱

با توجه به جدول (۶)، افزایش دمای سیال داغ ورودی به مبدل حرارتی سبب کاهش زمان ذوب و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده خواهد شد. طبق نتایج به دست آمده، زمان ذوب حالت ۳ در دمای ذوب ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به میزان ۲۶/۶۹ و ۴۰/۴۲ درصد نسبت به دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد؛ در حالی که میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده برای دو حالت مذکور به میزان ۴۰/۳۳ و ۷۸/۳۳ درصد افزایش می‌یابد.

۴.۶. تأثیر عدد رینولدز سیال داغ ورودی بر فرایند ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم

در جدول (۷) زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده سیستم مورد مطالعه برای سه عدد رینولدز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ارائه شده است. برای تمامی حالات مورد بررسی در قسمت ۴.۶، دامنه موج و دمای سیال داغ ورودی به ترتیب ۵ میلی‌متر و ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

جدول (۷): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالت ۳ در اعداد رینولدز مختلف		
حالت مورد بررسی	زمان ذوب (ثانیه)	میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده (وات)
حالت ۳ (عدد رینولدز ۵۰۰)	۴۲۴۶	۸۸/۶۵
حالت ۳ (عدد رینولدز ۱۰۰۰)	۴۰۵۲	۹۳/۱۸
حالت ۳ (عدد رینولدز ۱۵۰۰)	۳۹۰۵	۹۶/۹۱

با توجه به جدول (۷)، افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش نرخ تبادل حرارت سبب کاهش زمان ذوب و افزایش میزان ذخیره‌ی حرارتی خواهد شد. زمان ذوب حالت ۳ با اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ نسبت به حالت ۳ با عدد رینولدز ۵۰۰ به ترتیب به میزان ۴/۵۷ و ۸/۰۳ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۷) حالت ۳ با عدد رینولدز ۱۵۰۰ دارای بهترین عملکرد حرارتی است.

۵.۶. بررسی عددی تأثیر نوع ماده تغییر فازدهنده بر فرایند ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم

بعد از مشخص کردن حالت بهینه مبدل حرارتی و بررسی تأثیر دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی، در قسمت ۵.۶ به بررسی تأثیر نوع ماده تغییر فازدهنده بر بهبود عملکرد مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم پرداخته شده و دامنه موج، دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی به ترتیب ۵ میلی‌متر، ۵۰ درجه سلسیوس و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس فرض شده است. در این پژوهش فرض شده که حجم ماده تغییر فازدهنده مبدل حرارتی در تمامی حالت‌های مورد بررسی یکسان است. با توجه به اینکه مواد تغییر فازدهنده گوناگون دارای چگالی مختلفی هستند، جرم ماده تغییر فازدهنده در قسمت ۵.۶ برخلاف سایر قسمت‌های پیشین یکسان نخواهد بود. به همین منظور برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر نوع ماده تغییر فازدهنده بر فرایند ذوب به جای زمان ذوب، میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در حالت‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. سه نوع ماده تغییر فازدهنده مورد بررسی در این قسمت شامل RT-35، RT-35HC و n-eicosane است که خواص این گونه مواد در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول (۸) مقادیر زمان ذوب، جرم مواد تغییر فازدهنده و همچنین میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده برای حالات مختلف مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه ماده تغییر فازدهنده n-eicosane دارای بیشترین گرمای نهان ذوب است، زمان ذوب حالت ۳ با ماده تغییر فازدهنده n-eicosane دارای بیشترین زمان ذوب است. با توجه به جدول (۸) زمان ذوب حالت (۳) برای مواد تغییر فازدهنده RT-35HC و n-eicosane نسبت به زمان ذوب حالت ۳ با ماده RT-35 به ترتیب به میزان ۱۰۳/۰۸ و ۱۳۸/۳۰ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار ماده تغییر فازدهنده در هر یک از حالات مورد بررسی در جدول (۸) یکسان نیست، به منظور مشخص کردن حالت بهینه، نرخ ذخیره‌ی انرژی حرارتی برای سه حالت مورد بررسی در جدول (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج عددی به دست آمده، نرخ ذخیره‌ی انرژی حرارتی برای مواد تغییر فازدهنده RT-35HC و n-eicosane

نسبت به نرخ انرژی حرارتی ذخیره شده حالت ۳ با ماده RT-35 به ترتیب به میزان ۲۷/۱۲ و ۳۳/۸۹ کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه ضریب رسانندگی ماده تغییر فاز دهنده نقش بسیار کلیدی در فرایند تغییر فاز این گونه مواد بازی می‌کند، حالت ۳ با ماده تغییر فاز دهنده

جدول (۸): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره شده حالت ۳ برای انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده

حالت مورد بررسی	زمان ذوب (ثانیه)	جرم ماده تغییر فاز دهنده	میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (وات)
حالت ۳ (RT-35)	۴۰۵۲	۱/۶۹۳	۹۳/۱۸
حالت ۳ (RT-35 HC)	۸۲۲۹	۱/۸۱۴	۶۷/۹۱۳
حالت ۳ (n-eicosane)	۹۶۵۶	۱/۷۹۹	۶۱/۶۰۳

۷. نتیجه

فهرست علائم

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

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی فرایند تغییر فاز یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم در حضور صفحه میانی موج انجام شد. سپس تأثیر دامنه و طول موج صفحه میانی، دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی و نوع ماده تغییر فاز دهنده بر بهبود عملکرد حرارتی مبدل حرارتی بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش تراکم موج سینوسی در لبه پایینی مبدل حرارتی به طور چشمگیری سبب بهبود فرایند ذوب به ویژه در حالت ۳ گردید. میزان کاهش دمای ذوب و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره شده حالت ۳ نسبت به حالت ۱ (در غیاب صفحه میانی) به ترتیب برابر با ۶۷/۵۹ و ۲۰۰ درصد گزارش شد. همچنین افزودن صفحه میانی موج و دو صفحه مسطح بالایی و پایینی سبب متعادل‌تر شدن توزیع دما در مبدل حرارتی گردید. شایان ذکر است که اگرچه افزایش تراکم موج صفحه میانی سبب کاهش زمان ذوب و افزایش میزان انرژی ذخیره شده از طریق افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد گردید، تراکم بیش از حد موج صفحه میانی سبب ایجاد اثرات نامطلوبی بر فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی مورد بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش دما و عدد رینولدز سیال داغ ورودی به مبدل حرارتی سبب بهبود عملکرد حرارتی آن گردید. همچنین نتایج حاصل از بررسی تأثیر مواد مختلف تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی سیستم ذخیره حرارتی نشان داد که نرخ ذخیره انرژی حرارتی برای مواد تغییر فاز دهنده RT-35HC و n-eicosane نسبت به نرخ انرژی حرارتی ذخیره شده حالت ۳ با ماده RT-35 به ترتیب به میزان ۲۷/۱۲ و ۳۳/۸۹ کاهش می‌یابد. با توجه به مقایسه انجام گرفته حالت ۳ با ماده تغییر فاز دهنده RT-35 دارای بهترین عملکرد حرارتی است.

مراجع

- [1] Farzan, H., Zaim, E.H., Ameri, M., Amiri, T., "Study on effects of wind velocity on thermal efficiency and heat dynamics of pavement solar collectors: An experimental and numerical study", *Renewable Energy*, Vol. 163, pp. 1718–1728, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.087>.
- [2] Farzan, H., Zaim, E.H., Amiri, T., "Performance study on a new solar air heater with integrated phase change materials and external recycle: A numerical and experimental study", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 223, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120000>.
- [3] Farzan, H., Zaim, E.H., "Study on thermal performance of a new combined perforated Metallic/Asphalt solar air heater for heating Applications: An experimental study", *Solar Energy*, Vol. 249, pp. 485–494, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.008>.
- [4] 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>.
- [5] Arshad, A., Jabbal, M., Sardari, P. T., Bashir, M. A., Faraji, H., Yan, Y., "Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 18, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100520>.
- [6] Dinker, A., Agarwal, M., Agarwal, G. D., "Heat storage materials, geometry and applications: A review", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 90, No. 1, pp. 1–11, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.10.002>.
- [7] Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M., "Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array", *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 198–207, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.010>.
- [8] Darzi, A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., "Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 9, pp. 4080–4086, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.033>.
- [9] Lotfi, B., Sundén, B., Wang, Q., "An investigation of the thermo-hydraulic performance of the smooth wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers utilizing new type vortex generators", *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 1282–1302, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.065>.
- [10] Abdollahzadeh, M., Esmailpour, M., "Enhancement of phase change material (PCM) based latent heat storage system with nano fluid and wavy surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, pp. 376–385, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.007>.
- [11] Shahsavar, A., Al-Rashed, A.A.A.A., Entezari, S., Sardari, P.T., "Melting and solidification characteristics of a double-pipe latent heat storage system with sinusoidal wavy channels embedded in a porous medium", *Energy*, Vol. 171, pp. 751–769, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.045>.
- [12] Shahsavar, A., Khosravi, J., Mohammed, H. I., Sardari, P. T., "Performance evaluation of melting/solidification mechanism in a variable wave-length wavy channel double-tube latent heat storage system", *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101063>.
- [13] Shahsavar, A., Shaham, A., Sardari, P.T., "Wavy channels triple-tube LHS unit with sinusoidal variable wavelength in charging/discharging mechanism", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 93–105, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.012>.
- [14] Shahsavar, A., Majidzadeh, A.H., Mahani, R.B., Sardari, P.T., "Entropy and thermal performance analysis of PCM melting and solidification mechanisms in a wavy channel triplex-tube heat exchanger", *Renewable Energy*, Vol. 165, pp. 52–72, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.074>.
- [15] Eisapour, M., Eisapour, A.H., Shafaghat, A.H., Mohammed, H. I., Sardari, P.T., Chen, Z., "Solidification of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a double elliptical latent heat storage unit with wavy inner tubes", *Solar Energy*, Vol. 241, pp. 39–53, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.054>.
- [16] Boujelbene, M., Mohammed, H.I., Majdi, H. Sh., Babaei-Mahani, R., Sardari, P.T., Rahbari, A., "Melting performance of nano-enhanced phase change materials in a triple-tube heat exchanger with zigzag-shaped tubes", *Journal of Energy Storage*, Vol. 67, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107484>.
- [17] Eisapour, A.H., Shafaghat, A.H., Mohammed, H.I., Eisapour, M., Sardari, P.T., Brambilla, A., Fung, A.S., "A new design to enhance the conductive and convective heat transfer of latent heat thermal energy storage units", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 215, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118955>.
- [18] Iranmanesh, A., "Intensifying the melting

- process of a triple-tube latent heat energy storage unit via inserting a middle plate into the phase change material container*", Journal of Energy Storage, Vol. 56, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105982>.
- [19] Iranmanesh, A., "Numerical study on discharging process of a latent heat triple-tube heat exchanger in the presence of a central plate using the enthalpy-porosity approach", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2023, 10.1007/s10973-023-12341-8.
- [20] GmbH, R. T., "RT35 data sheet".
- [21] Benbrika, M., Tegger, M., Benbelhout, M., Ismail, K.A.R., "Numerical Study of *N-Eicosane* Melting Inside a Horizontal Cylinder for Different Loading Rates", International Journal of Heat and Technology, Vol. 38, No. 1, pp. 125–130, 2020.
- [22] Esapour, M., Hamzehnezhad, A., Darzi, R.A.A., Jourabian, M., "Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system", Energy Conversion and Management, Vol. 171, pp. 398–410, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.086>.
- [23] Elmozughi, A.F., Solomon, L., Oztekin, A., Neti, S., "Encapsulated phase change material for high temperature thermal energy storage – heat transfer analysis", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 1135–1144, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.087>.
- [24] Sardari, P.T., Walker, G.S., Gillott, M., Grant, D., Giddings, D., "Numerical modelling of phase change material melting process embedded in porous media: Effect of heat storage size", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 234, No. 3, pp. 365–383, 2019, 10.1177/0957650919862974.
- [25] Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Mohammad, A.T., "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins", Energy Conversion and Management, Vol. 74, pp. 223–236, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.003>.