

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

Aghil Iranmanesh,^{1*}  Ali Ghorbani,² Hadi Farzan^{3,4}

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

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

³ Mechanical Engineering Department, Higher Education Complex of Bam, Bam, Iran,
hadi.farzan@bam.ac.ir

⁴ Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran,
hadi.farzan@vru.ac.ir

Keywords:

melting process,
thermal storage system,
step fin,
phase change material,
porous medium.

Abstract: In the current paper, the effects of size and direction of step fins on improving the melting process of a vertical triple-tube heat exchange unit in the presence of a middle plate and porous medium are studied. The phase change process of the thermal energy storage unit is simulated using the enthalpy-porosity approach, developed in ANSYS FLUENT 2020 R2. The initial temperature and the temperature of heat transfer fluid, passing through the heat exchange unit, are supposed to be 15 and 50 C, respectively. Furthermore, the Reynolds number of the heat transfer fluid is assumed to be 1000. To evaluate the effects of step fins size and direction on boosting the melting process of the thermal unit, both liquid fraction and temperature contours of the cases with pure and composite PCM were compared. Based on the obtained numerical data, the effects of step fins geometries and direction on improving the thermal performance of the unit in the cases of pure PCM were greater than those of composite PCM. It should also be mentioned that energy storage values of the case with composite PCM (Case 3) increases by 166.69 % compared with that of the case with pure PCM.

Original Research Article

Paper History:

Received: 01/11/24

Revise: 15/12/2024

Accepted: 13/01/2025

How to cite this article: 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, No. 2, PP. 70-87, 2024. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.255727.1093>

© 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 the current study, the effects of step fins size and direction on boosting the melting process of a vertical triple-tube heat exchange unit in the presence of a middle plate and porous medium are studied

numerically. To evaluate the efficacy of step fins, middle plate and porous medium in improving the thermal performance of the unit, liquid fraction, and temperature contours of various cases with pure PCM are compared with those of the cases with composite

PCM. More details on the various cases studied in the present study are illustrated in Table 1.

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Case 1	6	4	5	4
Case 2	2	7	3	7
Case 3	7	2	7	3
Case 4	6	4	5	4
Case 5	2	7	3	7
Case 6	7	2	7	3

As the last step, the effects of porous medium characteristics, including porosity and pore density, on improving the thermal performance of the unit are numerically investigated.

Materials and Methods

To simulate the PCM melting process in the presence of a middle plate and porous medium numerically, the enthalpy-porosity methodology is applied and the porosity of the porous medium is assumed to be equal to the liquid fraction value in each cell. Due to the presence of viscous and inertial losses in the momentum equations, a pressure loss is also considered in the numerical simulation in addition to the pressure drop caused by the solid materials. The assumptions considered in the present study to simplify the numerical simulation of the LHTESS are as follows:

- The liquid phase was assumed to be Newtonian, laminar, and incompressible.
- The liquid phase density varied based on the Boussinesq approximation since there was a negligible temperature gradient in the liquid domain.
- The energy equation was applied in the simulation based on the thermal equilibrium model.
- An isotropic and homogenous porous medium was applied in the current research.
- Volume expansion, during the PCM phase change phenomenon was minor.
- Viscous dissipation effects were negligible during the numerical modeling.
- 2D axisymmetric condition was assumed for the fluid flow due to the geometry of the problem and shortage of circumferential gradient in the flow.

Results

In this section, the effects of step fin size and direction on boosting the thermal performance of the thermal unit are studied numerically. Both liquid fraction and temperature contours are compared in the cases of pure PCM and composite PCM. The effects of the middle plate and step fins are minor at the beginning of melting process. As time passes, these

effects become major. Based on the numerical data, adding the middle plate and step fins can significantly decrease the melting time of PCM. In case of pure PCM, the effects of step fins size on boosting the thermal performance of the heat storage unit are greater than those of step fins direction. In the case of composite PCM, the heat transfer rate intensifies due to the higher conductivity of composite PCM. Furthermore, the impacts of both step fin size and direction in enhancing the melting process of the PCM becomes minor. Furthermore, the lower and interior region inside the PCM does not convert to liquid totally. This can be due to the lower heat transfer area and the lack of convection heat transfer. Therefore, adding step fins to this region can accelerate the melting process of PCM considerably. To analyze the various scenarios considered in the current research, melting time values and heat storage rate of PCM in various cases are compared. Based on the presented data, step fins with higher lengths in case of pure PCM considerably improve the melting process of PCM. It should be mentioned that the melting time of case 6 decreases by 1.45 %, compared with that of case 3, while the heat storage rate increases by 1.05 %. It should be mentioned that the melting time of case 6 decreases by 3.17 and 17.4 %, compared with those of cases 4 and 5, respectively.

To illustrate the efficacy of the porous medium in enhancing the melting process of the heat storage unit, variations of both liquid fraction and PCM mean temperature in cases of pure PCM and composite PCM were compared. Based on these figures, gradient of PCM temperature increases in case of composite PCM due to a considerable increase in PCM conductivity at the beginning of the melting process. In other words, adding a porous medium to the PCM accelerates the thermal response of the PCM.

The impacts of porous medium characteristics, including porosity and pore density, in enhancing the melting process of the PCM are also investigated. Based on the obtained results, the effects of pore density in boosting the thermal response of the PCM are minor. Furthermore, thermal performance of the heat storage unit improves as the porosity decreases. In other words, the case with the lowest porosity yields the best thermal performance.

Discussion and Conclusion

In the current study, the effects of step fins geometry in enhancing the thermal response of the heat storage unit were studied in the case of pure and composite PCM. Firstly, the effects of step fin size and direction in boosting the thermal performance of the heat storage unit were compared in both pure and composite PCM. Based on the numerical data, the impacts of step fins size in improving the thermal response of the unit were greater than those of step fins direction in case of pure PCM. Furthermore, increasing the step fins size resulted in decreasing the melting time of the pure PCM. In case of composite

PCM, both step fins size and direction in enhancing the thermal response of the unit were negligible. Due to domination of the conduction of heat transfer over convective heat transfer at the beginning of the melting process, adding porous medium to the PCM resulted in higher temperature gradient. Furthermore, it was proposed to add step fins in the lower and interior region of the PCM container to enhance the thermal performance of the unit considerably. Finally,

the effects of the porous characteristics, including porosity and pore density, in boosting the thermal performance of the unit were studied. It was concluded that the impacts of pore density in improving the thermal performance of the heat storage unit were minor while decreasing the porosity of the porous medium improved the thermal performance of the unit.

مطالعه عددی تأثیر فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد یک سیستم ذخیره حرارتی در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل

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

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

iranmanesh.aghil@ujiroft.ac.ir

^۲ دانش‌آموخته گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

m.alighorbani1999@gmail.com

^۳ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزشی عالی بم، بم، ایران

hadi.farzan@bam.ac.ir

^۴ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

hadi.farzan@vru.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

فرایند ذوب،
سیستم ذخیره حرارتی،
فین پله‌ای،
ماده تغییر فازدهنده،
محیط متخلخل.

چکیده: در این پژوهش به بررسی تأثیر جهت و اندازه فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای قائم در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل پرداخته می‌شود. فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره حرارتی با استفاده از روش انتالی-تخلخل نرم‌افزار انسیس فلونت ۲۰۲۰ شبیه‌سازی شده است. دمای اولیه و دمای سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین عدد رینولدز سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. برای بررسی میزان تأثیر جهت و اندازه فین‌های پله‌ای بر بهبود راندمان حرارتی سیستم ذخیره انرژی، کانتورهای کسر حجمی سیال و دمای ماده تغییر فازدهنده در حالت ماده تغییر فازدهنده خالص و همچنین ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل باهم مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج عددی به دست آمده، تأثیر مشخصات هندسی و جهت فین‌های پله‌ای بر بهبود فرایند تغییر فاز سیستم مذکور در حالت ماده تغییر فازدهنده خالص بیشتر از ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل است. همچنین میزان انرژی ذخیره شده در حالت ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل (حالت ۳) نسبت به حالت ماده تغییر فازدهنده خالص ۱۶۶/۶۹ درصد افزایش خواهد یافت.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

۱. مقدمه

تمامی فعالیت‌های انسانی بر پایه انرژی بنا شده است. تقاضای انرژی در سال‌های اخیر به دلیل کاربرد انرژی در زمینه‌های مختلف خانگی و صنعتی افزایش یافته است. اگرچه عمده نیازهای اصلی انسان به واسطه استفاده از سوخت‌های فسیلی مرتفع شده‌اند، استفاده گسترده از این سوخت‌ها سبب ایجاد مخاطرات جدی در زمینه مسائل زیست‌محیطی شده‌اند. از عمده مخاطرات زیست‌محیطی می‌توان به ذوب یخ‌های قطبی، افزایش دمای کره زمین و... اشاره کرد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، یکی از راهکارهای ارائه شده توسط کارشناسان خبره این حوزه، برای به حداقل رساندن خطرات زیست‌محیطی است. با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی را به حداقل رساند. توسعه سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی به منظور مرتفع نمودن عدم تطابق بین میزان ذخیره و مصرف انرژی است. در مقیاس‌های بزرگ و کوچک، سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی دارای کاربردهای فراوانی هستند. در مقیاس بزرگ در نیروگاه‌های خورشیدی و زمین‌گرمایی کاربرد دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به ذخیره انرژی حرارتی و تولید برق اشاره کرد. همچنین در مقیاس کوچک‌تر برای ذخیره انرژی خورشیدی در منازل مسکونی کاربرد دارد [۱ و ۲]. انرژی حرارتی را می‌توان به دو روش گرمای نهان و محسوس در مواد و سیستم‌های مختلف ذخیره کرد. کاربرد سیستم‌های ذخیره حرارتی نهان در صنعت به مراتب بسیار گسترده‌تر از سایر حوزه‌هاست [۳]. بسته به ویژگی‌ها و عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، مواد ذخیره انرژی حرارتی شامل انواع مختلفی هستند. مواد تغییر فازدهنده به عنوان مواد ذخیره انرژی حرارتی گرمای نهان در نظر گرفته می‌شوند که در طی فرایند تغییر فاز، گرما را آزاد یا جذب می‌کنند [۴]. مواد تغییر فازدهنده، ضریب هدایت حرارتی نسبتاً پایینی دارند و همین امر سبب محدود شدن استفاده آن‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خواهد شد. تاکنون روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران خبره این حوزه برای جبران نمودن ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فازدهنده ارائه شده‌اند. این روش‌ها شامل افزودن نانو ذرات [۵]، اصلاح هندسه، استفاده از فین‌ها و مواد متخلخل هستند [۶].

یکی از کارآمدترین روش‌های ارائه شده برای جبران نمودن ضریب هدایت حرارتی پایین مواد تغییر فازدهنده، استفاده از مواد تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل با ضریب رسانش بالاست [۷]

و [۸]. در حضور محیط متخلخل، به دلیل بهبود ضریب رسانندگی ماده تغییر فازدهنده نرخ انتقال حرارت هدایت در ماده تغییر فازدهنده مرکب نسبت به ماده تغییر فازدهنده خالص افزایش پیدا می‌کند؛ در نتیجه زمان ذوب فرایند کاهش قابل توجهی را تجربه خواهد کرد [۹ و ۱۰].

با توجه به نقش کلیدی مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف و نیروگاه‌ها، تاکنون مطالعات زیادی برای بهبود عملکرد حرارتی آن‌ها با استفاده از محیط متخلخل انجام شده است.

لیو و همکاران [۱۱] با استفاده از محیط متخلخل، فرایند تغییر فاز یک مبدل حرارتی پوسته‌لوله‌ای را بهبود دادند. با توجه به نتایج عددی به دست آمده، افزودن محیط متخلخل به ماده تغییر فازدهنده سبب بهبود هفت‌برابری انتقال حرارت نسبت به ماده تغییر فازدهنده خالص گردید. ژائو و همکاران [۱۲] اثرات فوم فلزی مس را بر فرایند تغییر فاز RT58 مطالعه نمودند و این گونه نتیجه‌گیری کردند که بسته به ماده و شرایط محیط، استفاده از فوم فلزی می‌تواند فرایند تغییر فاز را تا حدود ۱۰ برابر افزایش دهد. لی و همکاران [۱۳] به صورت عددی تأثیر اضافه نمودن نانوذره و محیط متخلخل به ماده تغییر فازدهنده را بر فرایند ذوب و انجماد مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای بررسی نمودند. با افزودن محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹۵، زمان ذوب و انجماد به ترتیب به میزان ۸۴/۷ و ۸۸/۲ درصد نسبت به ماده تغییر فازدهنده خالص کاهش یافت. جابری و همکاران [۱۴] به صورت عددی تأثیر اضافه نمودن فین متخلخل بر بهبود فرایند ذوب یک سیستم ذخیره حرارتی افقی را مطالعه کردند. با توجه به نتایج عددی گزارش شده، اضافه نمودن فین متخلخل سبب کاهش زمان ذوب به میزان ۴۶/۴ درصد نسبت به فین غیرمتخلخل گردید. خانلری و همکاران [۱] یک تحلیل عددی در زمینه بهبود عملکرد یک کلکتور هواخورشیدی با ادغام مواد تغییر فازدهنده و افزودن تعدادی فین متخلخل داخل محفظه مواد تغییر فازدهنده را بررسی کردند و در نهایت گزارش کردند که افزودن فین‌های متخلخل به مواد تغییر فازدهنده باعث تسریع فرایند ذوب، افزایش میانگین بهره‌وری انرژی و بهبود عملکرد کلی سیستم ذخیره‌سازی انرژی گردید. همچنین میانگین راندمان حرارتی کلکتور مورد مطالعه در بازه ۳۸/۶۶ تا ۴۱/۷۳ درصد گزارش شد. بونومو و همکاران [۱۵] مطالعاتی در زمینه تأثیر فوم فلزی آلومینیومی بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان در حضور ماده تغییر فازدهنده انجام دادند. سیستم پیشنهادی از یک پوسته عمودی و دو لوله متحدالمرکز ساخته شده بود و طبق بررسی‌هایی که انجام شد، این گونه نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام شده، تأثیر فین‌های پله‌ای در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی تاکنون بررسی نشده است. لذا در پژوهش حاضر، تأثیر اضافه نمودن فین‌های پله‌ای با اندازه‌های متفاوت در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل بر بهبود عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم بررسی خواهد شد. کمتر شدن زمان ذوب و افزایش نرخ ذخیره انرژی مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم هدف اصلی این پژوهش است. در پژوهش حاضر، ۶ حالت فین پله‌ای رو به پایین و رو به بالا با اندازه‌های متفاوت در حضور صفحه میانی در نظر گرفته شده است و نتایج عددی آن‌ها در بستر محیط متخلخل بررسی خواهد شد. در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل بهتر نتایج عددی، توزیع کسر حجمی و دمای ماده تغییر فازدهنده حالت‌های مختلف برای مشخص کردن بهترین حالت مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۲. سیستم ذخیره انرژی مورد مطالعه

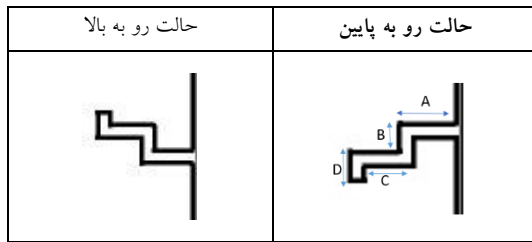
در پژوهش حاضر تأثیر جهت و اندازه فین‌های پله‌ای در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل بر بهبود فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم بررسی خواهد شد. برای بهتر شدن فرایند انتقال حرارت از سیال گذرنده داغ مبدل حرارتی به ماده تغییر فازدهنده، آرایش سیال داغ گذرنده از مبدل حرارتی به صورت غیرهمسو^۱ در نظر گرفته شده است. جهت سیال داغ گذرنده از لوله داخلی مبدل حرارتی به سمت بالا و جهت جریان سیال داغ گذرنده از لوله خارجی مبدل حرارتی به سمت پایین است.

برای تسریع شبیه‌سازی عددی، مسئله به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است و طبق مطالعات قبلی، صفحه میانی سبب بهتر شدن فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم خواهد شد. تعیین بهترین مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم در حضور صفحه میانی، محیط متخلخل و فین‌های پله‌ای با اندازه‌های متفاوت، هدف اصلی این پژوهش است. بدین منظور، حالت‌های مختلفی برای مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. در این پژوهش حاضر ضخامت صفحه میانی ۸ میلی‌متر است. در این پژوهش ابتدا تأثیر تغییر اندازه فین‌های پله‌ای و جهت آن بر فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره انرژی در غیاب محیط متخلخل بررسی می‌شود. سپس تأثیر اضافه نمودن محیط متخلخل بر فرایند ذوب مبدل حرارتی برای حالات مورد بررسی مطالعه خواهد شد. میزان تخلخل ماده تغییر فازدهنده ۹۵ درصد و اندازه تراکم منافذ (PPI) ۱۰ در نظر گرفته شده است. اطلاعات بیشتر در زمینه حالت‌های مورد

کردند که زمان ذوب با افزایش ضخامت فوم فلزی کاهش می‌یابد. همچنین اختلاف تغییرات انرژی ذخیره شده در حالت ماده تغییر فازدهنده خالص و ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل با درصد تخلخل ۹۰ درصد در حدود ۴/۵ درصد گزارش شد.

ساینی و همکاران [۱۶] برای بهبود عملکرد یک سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان ارزشیابی‌هایی را به صورت عددی انجام دادند و با افزودن فین‌ها، نانوذرات و فوم‌های فلزی به طور قابل توجهی فرایند انجماد مواد تغییر فازدهنده را بهبود دادند. آن‌ها گزارش کردند که ترکیب کردن فوم فلزی و نانوذرات زمان انجماد را تا ۷۳/۶۸ درصد کاهش می‌دهد و افزودن فین‌ها سبب کاهش ۴۲ درصدی زمان ذوب می‌گردد. ایرانمنش و مشیزی [۱۷] از طریق افزودن یک دیواره میانی موج‌دار با طول موج ثابت سینوسی داخل یک محفظه ماده تغییر فازدهنده، فرایند تغییر فاز یک سیستم ذخیره انرژی گرمای نهان سه‌لوله‌ای عمودی را بهبود دادند و این‌گونه نتیجه‌گیری کردند که افزایش ضخامت دیواره میانی موج‌دار سبب بهبود فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره انرژی گردید. همچنین کاهش طول موج سینوسی دیواره میانی سبب بهبود انتقال حرارت سیستم مورد مطالعه شد. عبدی و همکاران [۱۸] به صورت عددی تأثیر فین‌های عمودی مستقیم بر نرخ انتقال گرما و ظرفیت ذخیره‌سازی را در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که تأثیر طول فین نسبت به تعداد فین بر بهبود فرایند ذوب به مراتب بیشتر بود. نخچی و اصفهانی [۱۹] به صورت عددی فرایند ذوب یک سیستم ذخیره انرژی را در حضور فین‌های پله‌ای مطالعه کردند. در مطالعه انجام شده تأثیر جهت و اندازه فین بر فرایند ذوب مبدل حرارتی بررسی شد. با توجه به نتایج گزارش شده، جایگزینی فین‌های پله‌ای رو به پایین با فین‌های عادی می‌تواند تا میزان ۶۵/۵ درصد فرایند ذوب مبدل حرارتی را بهبود ببخشد.

اگینوم و همکاران [۲۰] مطالعاتی در زمینه بهبود عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی دولوله‌ای انجام دادند و گزارش کردند که افزایش تعداد لوله‌های مبدل حرارتی سبب افزایش دمای ماده تغییر فازدهنده گردید. ایرانمنش [۲۱] با شبیه‌سازی عددی یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی و با اضافه کردن یک صفحه میانی به محفظه مبدل حرارتی، عملکرد مبدل حرارتی را در حالت ذوب بهبود داد. نتایج گزارش شده از پژوهش مذکور نشان داد که زمان ذوب در حالت حضور صفحه میانی نسبت به حالت بدون صفحه میانی ۵۲/۶۲ درصد کاهش یافت و نرخ ذخیره انرژی نسبت به حالت بدون صفحه میانی ۱۰۹/۹ درصد افزایش یافت.



شکل (۱): فین‌های پله‌ای در دو حالت مختلف

مطالعه در پژوهش حاضر در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده‌اند. همچنین ماده تغییر فازدهنده در این پژوهش RT-35 و سیال داغ ورودی آب در نظر گرفته شده است. خواص فیزیکی ماده تغییر فازدهنده و سیال داغ ورودی به مبدل حرارتی (آب) در جداول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند. همچنین نماهای دوبعدی و سه‌بعدی حالات مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): اندازه فین‌های پله‌ای در حالت‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

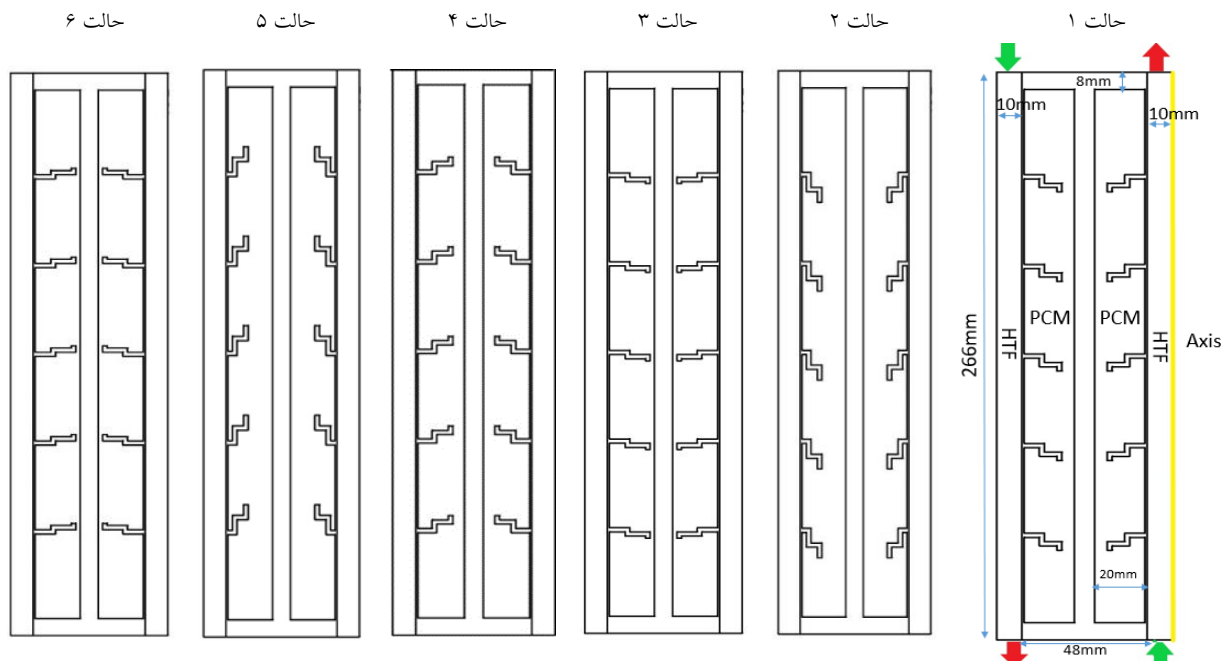
D (mm)	C (mm)	B (mm)	A (mm)	حالت‌ها
۴	۵	۴	۶	حالت ۱ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به پایین)
۷	۳	۷	۲	حالت ۲ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به پایین)
۳	۷	۲	۷	حالت ۳ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به پایین)
۴	۵	۴	۶	حالت ۴ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به بالا)
۷	۳	۷	۲	حالت ۵ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به بالا)
۳	۷	۲	۷	حالت ۶ (صفحه میانی با فین‌های پله‌ای رو به بالا)

جدول (۲): خواص فیزیکی ماده تغییر فازدهنده مورد بررسی در پژوهش حاضر (RT-35)

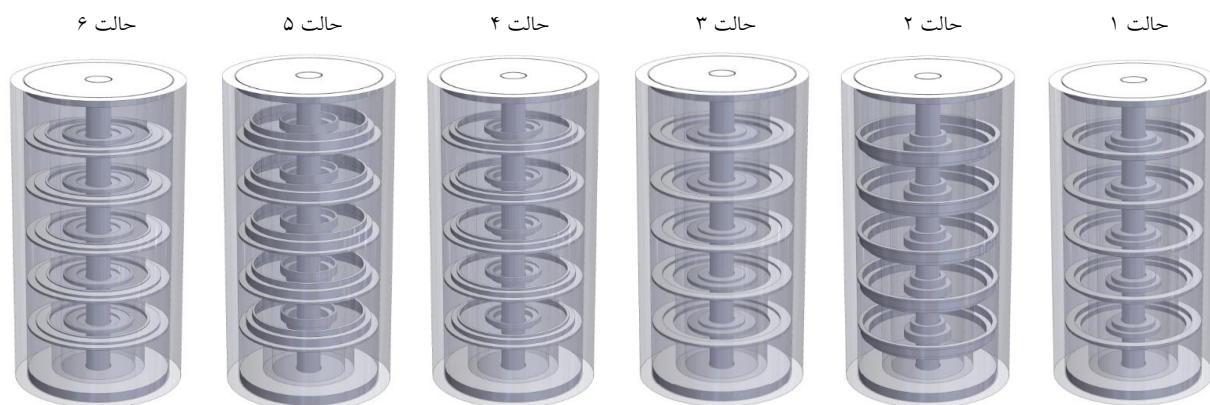
β [J/K]	$T_{Solidus}$ [K]	$T_{Liquidus}$ [K]	μ [N.s/m ²]	k [W/m.K]	C_p [kJ/kg.K]	L_f [kJ/kg]	ρ_s [kg/m ³]	ρ_L [kg/m ³]	خواص
۰/۰۰۰۶	۳۰۲/۲	۳۰۹/۲	۰/۰۲۳	۰/۲	۲/۰	۱۷۰	۸۶۰	۷۷۰	RT-35

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

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



شکل (۲): نماهای دوبعدی حالات‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر



شکل (۳): نماهای سه بعدی حالت‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

۳. معادلات حاکم در مسئله

در این پژوهش، از مدل آنتالپی-تخلخل برای شبیه‌سازی عددی فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده استفاده شده است که در آن تخلخل برابر با کسر حجمی مایع در هر سلول در نظر گرفته می‌شود. در حضور ماده متخلخل علاوه بر افت فشار ناشی از مواد جامد، افت فشار نیز وجود دارد؛ به همین دلیل تلفات لزجی و اینرسی در معادله تکانه در نظر گرفته خواهد شد [۲۲]. در مطالعه حاضر فرضیات زیر برای مدل‌سازی فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی در نظر گرفته شده‌اند [۱۱ و ۲۳]:

- فازمایع، سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است.
- رژیم جریان آرام است.
- محیط متخلخل، همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است.
- مدل تعادل حرارتی در معادله انرژی استفاده شده است.
- افزایش حجم ماده تغییر فازدهنده حین فرایند تغییر فاز ناچیز است.
- در پژوهش حاضر، از اتلافات لزجی صرف‌نظر شده است.

معادلات حاکم بر مسئله به صورت زیر هستند [۲۴]:

معادله بقای جرم:

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

معادله مومنتوم:

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

که جمله S عبارت است از:

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

میزان ثابت ناحیه خمیری برابر با 10^5 است. همچنین جمله \vec{F} عبارت است از:

$$\vec{F} = \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C |\vec{V}|}{\sqrt{K}} \right) \vec{V} \quad (4)$$

در معادله فوق K نفوذپذیری ماده متخلخل است که از رابطه (۵) به دست می‌آید. همچنین با استفاده از رابطه (۶)، ضریب اینرسی قابل محاسبه است.

$$K = 0.00073 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_L}{d_p} \right)^{-1.11} \quad (5)$$

$$C = 0.00212 (1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_L}{d_p} \right)^{-1.63} / \sqrt{K} \quad (6)$$

در معادلات بالا جمله‌های d_L و d_p از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$d_L = 1.18 d_p \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon)}{3\pi}} \quad (7)$$

$$\times \left(\frac{1}{1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04}} \right) \quad (8)$$

معادله انرژی:

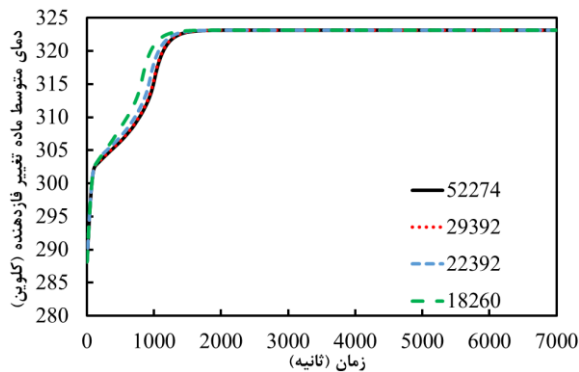
$$\frac{\partial \varepsilon \rho_f C_{p,f} T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f C_{p,f} \vec{V} T) = \nabla \cdot (K_e \nabla T) - S_L \quad (9)$$

که جمله S_L در معادله انرژی، با استفاده از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$S_L = \frac{\partial \varepsilon \rho_f \lambda L_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{V} \lambda L_f) \quad (10)$$

آنتالپی کل مجموع گرمای محسوس و نهان است. آنتالپی کل از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

شده است. همچنین معیار همگرایی برای معادله انرژی 10^{-6} و برای معادلات بقای جرم و مومنتوم 10^{-4} در نظر گرفته شده است. گام زمانی در مدل‌سازی عددی ثابت در نظر گرفته شده و حداکثر تعداد تکرار در هر گام برابر با ۲۰۰ است. ابتدا برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج عددی به شبکه، بایستی مطالعه استقلال از شبکه انجام گیرد. نتایج استقلال از شبکه پژوهش حاضر برای حالت ۳ و در حضور محیط متخلخل در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل (۴): نتایج استقلال از شبکه مطالعه حاضر

با توجه به شکل (۴) دمای متوسط ماده تغییر فزاینده برای تعداد المان ۲۹۳۹۲ مستقل از شبکه است. برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج حل عددی به گام زمانی، آنالیز مشابهی برای گام زمانی $0/05$ و $0/1$ و $0/2$ ثانیه و تعداد المان ۲۹۳۹۲ انجام گرفت. نتایج عددی مطالعه استقلال از گام زمانی در جدول (۴) ارائه شده‌اند. با توجه به تأثیر بسیار ناچیز میزان گام زمانی بر نتایج عددی، میزان گام زمانی در مدل‌سازی حاضر نهایتاً برابر با $0/2$ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی دقت روش عددی به کاررفته در پژوهش حاضر، نتایج عددی حاصل از پژوهش نخچی و اصفهانی [۱۹] با نتایج عددی پژوهش حاضر در شکل (۵) مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۵)، تغییرات کسر حجمی سیال برای یک مبدل حرارتی در حضور فین پله‌ای با نسبت منظری فین ۱ و رو به پایین، تطابق خوبی با نتایج عددی پژوهش حاضر دارند. همچنین برای اعتبارسنجی روش حل عددی به منظور مدل‌سازی محیط متخلخل، نتایج عددی لیو و همکاران [۱۱] با نتایج حل عددی به دست آمده از پژوهش حاضر در شکل (۶) مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۶)، بین نتایج عددی شبیه‌سازی مطالعه حاضر و نتایج عددی لیو و همکاران [۱۱] تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود.

جدول (۴): نتایج استقلال از گام زمانی برای تعداد المان ۲۹۳۹۲

گام زمانی (ثانیه)	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵
زمان ذوب (ثانیه)	۱۰۰۹	۱۰۰۶	۱۰۰۸

$$H = h + \Delta H \quad (11)$$

که h عبارت است از:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C\rho_f dT \quad (12)$$

۴. شرایط مرزی و اولیه مسئله

نماهای دوبعدی از مسئله مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. با توجه به هندسه مورد مطالعه و تقارن موجود، شرط مرزی تقارن محوری^۱ برای ضلع سمت راست سیستم ذخیره حرارتی در نظر گرفته شده است:

$$u = 0 \quad (13)$$

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

به جز نواحی ورودی و خروجی جریان سیال داغ، شرط مرزی ضلع سمت چپ، بالا و پایین، آدیاباتیک و دیواره فرض شده‌اند که معادلات حاکم عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (14) \text{ دیواره عمودی}$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (15) \text{ دیواره افقی}$$

$\vec{V} = 0 \rightarrow u = 0, v = 0$
 شرط مرزی برای ناحیه خروجی سیال داغ، شرط مرزی فشار خروجی^۲ و برای ناحیه ورودی سیال داغ، ورودی سرعت^۳ (بر اساس عدد رینولدز ۱۰۰۰) در نظر گرفته شده است:

$$T = 323.2 \text{ K} \quad (16) \text{ ناحیه ورودی لوله}$$

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

$$T = 323.2 \text{ K} \quad (17) \text{ ناحیه ورودی لوله}$$

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

$$P = P_{atm} \quad (18) \text{ ناحیه خروجی لوله}$$

داخلی و خارجی

در مطالعه حاضر، شرایط اولیه برای کسر حجمی ماده تغییر فزاینده، سرعت‌ها، دمای اولیه و فشار نسبی به ترتیب برابر با 0 ، 0 ، $288/2$ کلین و 0 در نظر گرفته شده است.

۵. مطالعه استقلال از شبکه و اعتبارسنجی روش عددی

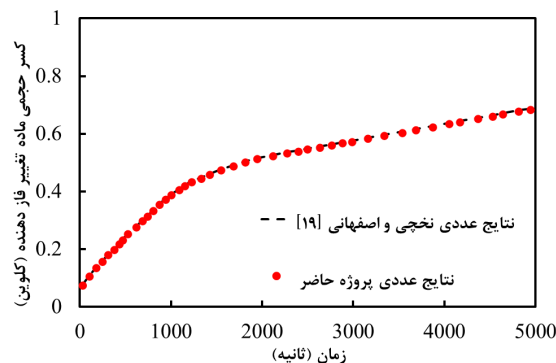
در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی عددی فرایند تغییر فاز سیستم ذخیره حرارتی، از نرم‌افزار انیسيس فلونت ۲۰۲۰ نسخه R2 استفاده

1. Axis
2. Pressure outlet
3. Velocity inlet

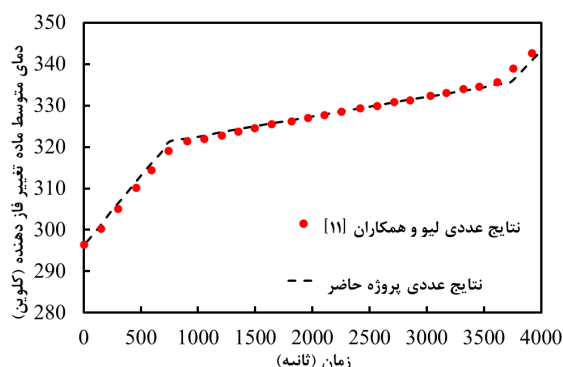
با توجه به شکل (۷) تا زمان ۶۰۰ ثانیه تأثیر فین‌های پله‌ای بر کسر حجمی سیال بسیار ناچیز است. با گذر زمان میزان انتقال حرارت بیشتر می‌شود و نقش صفحه میانی و فین‌های پله‌ای بر فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی پررنگ‌تر می‌شود. به دلیل اینکه سیال داغ در لوله خارجی سطح مؤثر بیشتری نسبت به لوله داخلی دارد، تغییر فاز در لوله بیرونی مبدل حرارتی بیشتر است. همچنین به دلیل وجود انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، در قسمت‌های بالایی مبدل حرارتی فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده بسیار بیشتر از لوله پایینی مبدل حرارتی است. در زمان ۳۶۰۰ ثانیه در تمامی حالات دو بخش محفظه حاوی ماده تغییر فازدهنده به‌طور کامل تغییر فاز داده است. اضافه کردن فین‌های پله‌ای و صفحه میانی می‌تواند فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی را بهبود ببخشد. با توجه به شکل (۷) در حالت‌های ۲ و ۵ با فین‌های پله‌ای رو به پایین و بالا با اندازه‌های یکسان، در زمان ۲۴۰۰ ثانیه نسبت به حالت‌های ۳ و ۶ بخش کمتری از ماده تغییر فازدهنده تغییر فاز داده است. لذا فین‌های با طول کمتر نسبت به فین‌های با طول بزرگ‌تر توانایی کمتری برای انتقال حرارت به عمق ماده تغییر فازدهنده دارند. همچنین تأثیر جهت فین‌های پله‌ای بر فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی بسیار ناچیز است. حالت ۵ به دلیل وجود فین‌های پله‌ای با عمق نفوذ کمتر، توانایی کمتری برای انتقال حرارت به عمق ماده تغییر فازدهنده دارد؛ لذا حالت مذکور بدترین عملکرد حرارتی را نسبت به سایر حالت‌ها خواهد داشت.

در حالت حضور ماده متخلخل، نرخ انتقال حرارت به دلیل رسانندگی بیشتر در مقایسه با ماده تغییر فازدهنده خالص تشدید می‌شود. تا زمان ۳۰۰ ثانیه، تأثیر ماده متخلخل بر کسر حجمی سیال ناچیز است. با گذر زمان و افزایش انتقال حرارت، تأثیر ماده متخلخل بیشتر می‌شود و در زمان ۱۲۰۰ ثانیه، در تمامی حالات مورد بررسی تمامی ماده تغییر فازدهنده موجود در دو محفظه داخلی و میانی سیستم ذخیره حرارتی تغییر فاز داده است. با توجه به اینکه در زمان ۱۲۰۰ ثانیه بخش ناچیزی از ماده تغییر فازدهنده خالص تغییر فاز داده است، افزودن محیط متخلخل می‌تواند به‌صورت قابل توجهی زمان ذوب سیستم ذخیره حرارتی را کاهش دهد.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییر اندازه فین‌های پله‌ای بر فرایند ذوب ماده تغییر فازدهنده، توزیع دمای حالت‌های مختلف مورد بررسی در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۸) افزودن صفحه میانی و فین‌های پله‌ای به مبدل حرارتی سبب متعادل‌تر شدن توزیع دما در مبدل حرارتی می‌شود. با توجه به نتایج عددی به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف، میزان انتقال حرارت در حالات ۱



شکل (۵): مقایسه تغییرات کسر حجمی سیال برای یک مبدل حرارتی در حضور فین پله‌ای و با نسبت منظری ۱ با نتایج عددی پژوهش حاضر



شکل (۶): مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج عددی لیو و همکاران [۱۱]

۶. نتایج و بحث

در این قسمت تأثیر تغییر اندازه و جهت فین‌ها بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم در حضور ماده تغییر فازدهنده خالص و همچنین ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای سهولت در مقایسه حالات مختلف، طول فین‌ها در تمامی حالات مورد مطالعه یکسان در نظر گرفته شده است.

۱.۶. تأثیر تغییر اندازه و جهت فین‌های پله‌ای بر فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم

برای بررسی دقیق تأثیر تغییر اندازه و جهت فین‌های پله‌ای بر فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم، توزیع کسر حجمی سیال و دمای ماده تغییر فازدهنده برای حالت‌های مختلف در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که گفته شد، سیال داغ از لوله‌های داخلی و خارجی مبدل حرارتی به‌صورت غیرهمسو عبور می‌کند. از این‌رو بخشی از گرمای سیال داغ از دیواره بیرونی و داخلی به صفحه میانی و فین‌ها و در نهایت به ماده تغییر فازدهنده منتقل می‌شود. دمای آب داغ ورودی برابر با ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دمای اولیه ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

بیشتر مبدل حرارتی رخ دهد. همچنین ماده تغییر فازدهنده در لبه داخلی و پایینی مبدل حرارتی نسبت به سایر نقاط فرایند ذوب دیرتری را تجربه می‌کند و افزایش فین‌های پله‌ای در این ناحیه می‌تواند فرایند ذوب مبدل حرارتی را بهبود ببخشد.

مقادیر زمان ذوب و انرژی حرارتی ذخیره‌شده در حالات مختلف مورد بررسی در پژوهش حاضر در جدول (۵) ارائه شده‌اند. با توجه به داده‌های جدول (۵)، در حالت ۶ و در حضور ماده تغییر فازدهنده خالص، حضور فین‌های پله‌ای با عمق نفوذ زیاد سبب کاهش زمان ذوب و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در مبدل حرارتی خواهد شد. میزان کاهش زمان ذوب حالت ۶ نسبت به حالت ۳، ۱/۴۵ درصد و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده ۱/۰۵ درصد است و میزان کاهش زمان ذوب حالت ۶ نسبت به حالت‌های ۴ و ۵ که اندازه‌های متفاوتی دارند، به ترتیب ۳/۱۷ و ۱۷/۴ درصد است. همچنین میزان افزایش انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالت ۶ نسبت به حالت‌های ۴ و ۵ به ترتیب ۲/۶ و ۱۹/۷ درصد است. مطابق با جدول (۵)، در حالت ۳ و در حضور ماده تغییر فازدهنده و محیط متخلخل، کاهش زمان ذوب نسبت به حالت ۶ که جهت‌های متفاوتی دارند، ۰/۱۹ درصد و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده ۰/۲۱ درصد است. همچنین میزان کاهش زمان ذوب حالت ۳ نسبت به حالت‌های ۱ و ۲ که اندازه‌های متفاوتی دارند، به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۸۸ درصد بوده و میزان افزایش انرژی حرارتی ذخیره‌شده حالات مذکور به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۴۳ درصد است.

نمودار تغییرات کسر حجمی سیال و همچنین دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده در غیاب/حضور محیط متخلخل برحسب زمان در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های (۹) تا (۱۲)، تأثیر اندازه و جهت فین‌های پله‌ای بر میزان کسر حجمی سیال و دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده در غیاب محیط متخلخل به مراتب بیشتر از حالت مورد بررسی در حضور محیط متخلخل است. با توجه به شکل‌های (۹) و (۱۰)، تأثیر اندازه فین‌های پله‌ای بر عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی در غیاب محیط متخلخل به مراتب از تأثیر جهت فین‌های پله‌ای بیشتر است. همچنین با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۲)، افزودن محیط متخلخل سبب افزایش گرادیان دمای ماده تغییر فازدهنده خواهد شد.

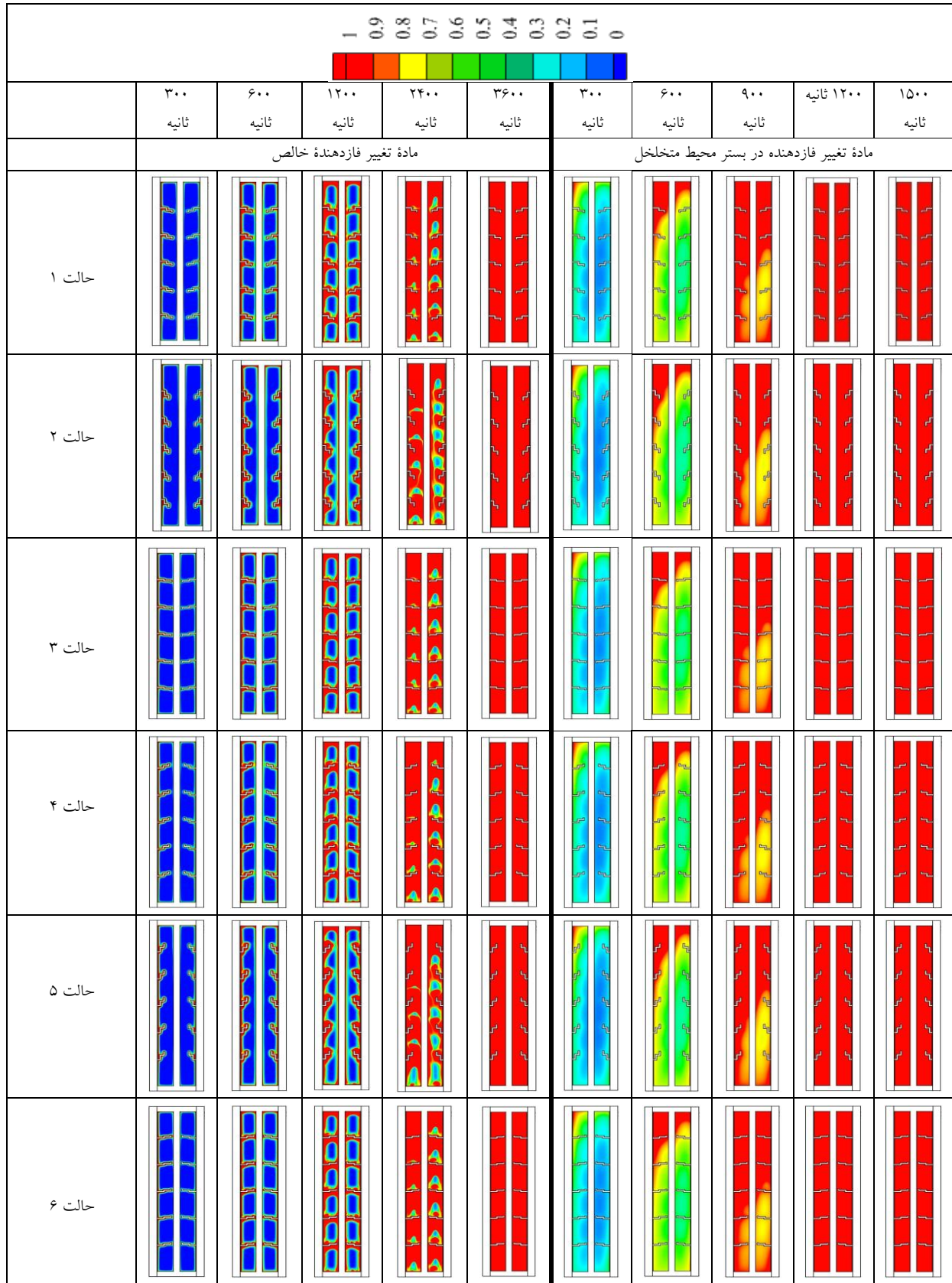
برای بررسی دقیق‌تر تأثیر محیط متخلخل بر بهبود فرایند ذوب سیستم ذخیره حرارتی، تغییرات بردار سرعت برای حالت (۳) در زمان ۶۰۰ ثانیه و در دو حالت ماده تغییر فازدهنده خالص و ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل در شکل (۱۳) مقایسه

و ۲ (جهت فین رو به پایین) نسبت به حالات ۴ و ۵ (جهت فین رو به بالا) بهتر است. این اثر می‌تواند به دلیل محبوس شدن جریان و در نتیجه بهبود فرایند ذوب باشد. در حالات ۳ و ۶ به دلیل حضور فین پله‌ای با عمق نفوذ زیاد تأثیر جهت فین پله‌ای بر فرایند ذوب مبدل حرارتی ناچیز است.

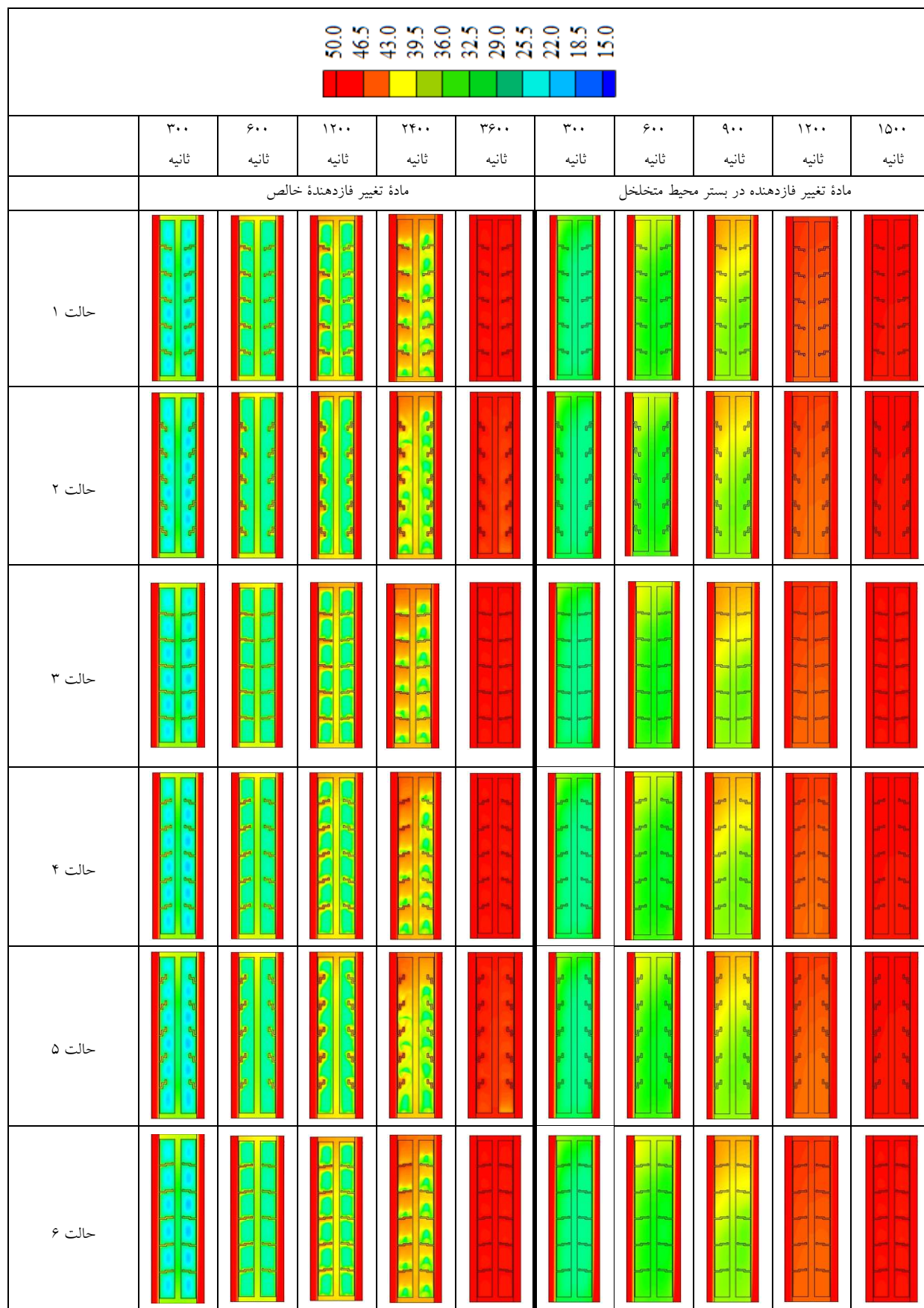
ماده تغییر فازدهنده ذوب شده با دمای بالاتر تحت تأثیر جابه‌جایی طبیعی به سمت بالا حرکت می‌کند. در مقابل، ماده تغییر فازدهنده در پایین محفوظه هنوز سرد و جامد است. با گذشت زمان میزان انتقال حرارت از طریق صفحه میانی و فین‌های پله‌ای افزایش می‌یابد. افزودن فین‌های پله‌ای در لبه پایینی مبدل حرارتی باعث بهبود فرایند ذوب مبدل حرارتی از طریق افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) می‌توان مشاهده نمود که سرعت ذوب با افزایش میزان نفوذ فین‌های پله‌ای در عمق ماده تغییر فازدهنده افزایش می‌یابد. در حالت‌های ۲ و ۵ به دلیل سطح تبادل حرارت و انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی کمتر، دمای ماده تغییر فازدهنده نسبت به سایر حالات مورد بررسی کمتر است. همچنین در حالت ۲ به دلیل اثر احتباسی جریان، توزیع دمای ماده تغییر فازدهنده نسبت به حالت ۵ بهبود یافته است.

در زمان‌های ابتدایی کسر حجمی ماده تغییر فازدهنده مرکب بسیار ناچیز است. با گذر زمان و افزایش انتقال حرارت از طریق صفحه میانی و فین‌های پله‌ای فرایند تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده مرکب تسریع می‌شود. انتقال حرارت از آب داغ در لوله‌های داخلی و خارجی با دو مکانیزم رسانش و جابه‌جایی انجام می‌شود. وجود جابه‌جایی طبیعی در مبدل حرارتی، سبب گردش سیال به سمت بالا می‌شود و با توجه به اینکه آب داغ در لوله بیرونی سطح مؤثر بیشتری نسبت به لوله داخلی دارد، انتقال گرما از این قسمت بیشتر صورت گرفته و ماده تغییر فازدهنده بیشتری تغییر فاز می‌دهد. به دلیل افزایش سرعت انتقال حرارت توسط ساختار محیط متخلخل، تأثیر فین‌های پله‌ای به مراتب کم‌رنگ‌تر می‌شود. همچنین تغییر اندازه فین‌های پله‌ای در ماده تغییر فازدهنده مرکب تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی ندارد. به دلیل غالب بودن مکانیزم هدایت بر جابه‌جایی در ابتدای فرایند تغییر فاز، فرایند ذوب با نرخ بیشتری انجام می‌شود. شیب تند نمودارها در زمان‌های ابتدایی نشان‌دهنده این ادعاست. با توجه به شکل (۷)، بیشترین میزان ذوب در لبه بالایی و بیرونی مبدل حرارتی در حالت حضور محیط متخلخل رخ می‌دهد. این فرایند می‌تواند به دلیل غالب بودن انتقال حرارت جابه‌جایی بر هدایت در زمان‌های میانی فرایند و همچنین سطح تبادل حرارتی

شده‌اند. با توجه به شکل (۱۳)، افزودن محیط متخلخل به ماده تغییر حرارت جابه‌جایی طبیعی شود. فازدهنده می‌تواند سبب ایجاد گردابه و در نتیجه افزایش انتقال



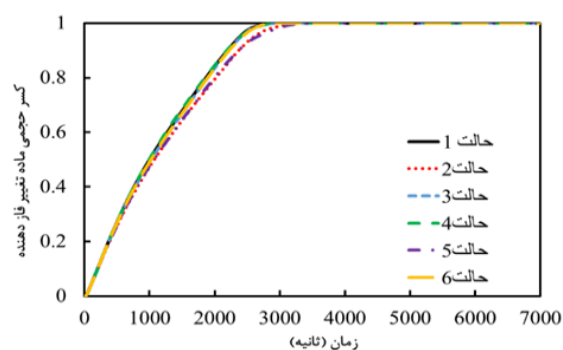
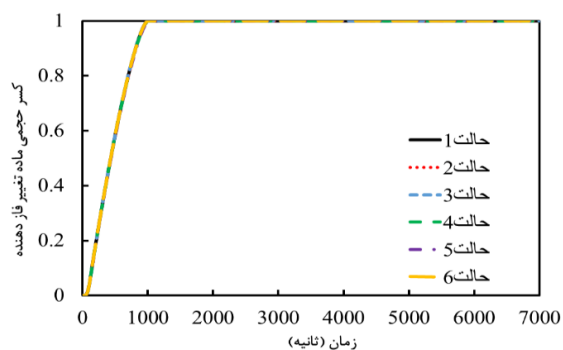
شکل (۷): توزیع کسر حجمی سیال برای فرایند ذوب مختلف در نظر گرفته شده در این پژوهش در زمان‌های مختلف



شکل (۸): توزیع دمای ماده تغییر فازدهنده برای فرایندهای ذوب حالت‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش در زمان‌های مختلف

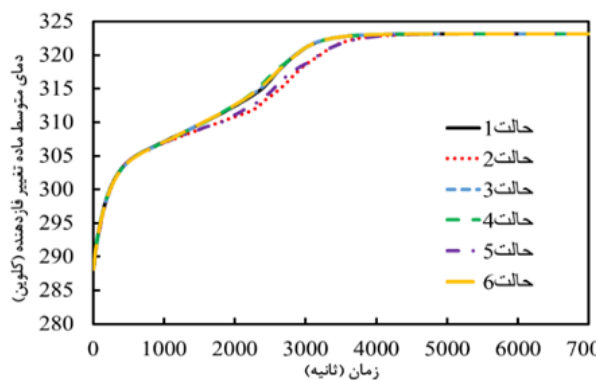
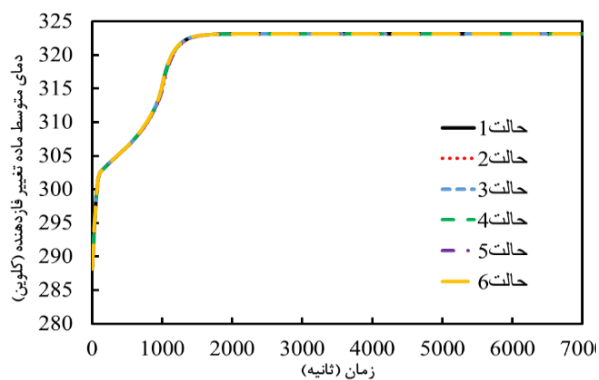
جدول (۵): مقادیر زمان ذوب و میزان انرژی حرارتی ذخیره شده در حالت های مختلف

میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (وات)		زمان ذوب (ثانیه)		حالات مورد بررسی
ماده متخلخل	ماده تغییر فازدهنده خالص	ماده متخلخل	ماده تغییر فازدهنده خالص	
۳۲۷/۹	۱۲۳/۹	۱۰۱۲	۲۹۴۶	حالت ۱ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به پایین)
۳۲۵/۷	۱۰۸/۷	۱۰۱۸	۳۳۷۴	حالت ۲ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به پایین)
۳۲۹/۱	۱۲۳/۴	۱۰۰۹	۲۹۶۶	حالت ۳ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به پایین)
۳۲۶/۹	۱۲۱/۵	۱۰۱۶	۳۰۱۹	حالت ۴ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به بالا)
۳۲۴	۱۰۴/۱	۱۰۲۵	۳۵۴۲	حالت ۵ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به بالا)
۳۲۸/۴	۱۲۴/۷	۱۰۱۱	۲۹۲۳	حالت ۶ (صفحه میانی با فین های پله ای رو به بالا)



شکل (۱۰): نمودار تغییر کسر حجمی سیال برحسب زمان برای حالت های مختلف مورد بررسی در پژوهش حاضر (ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل)

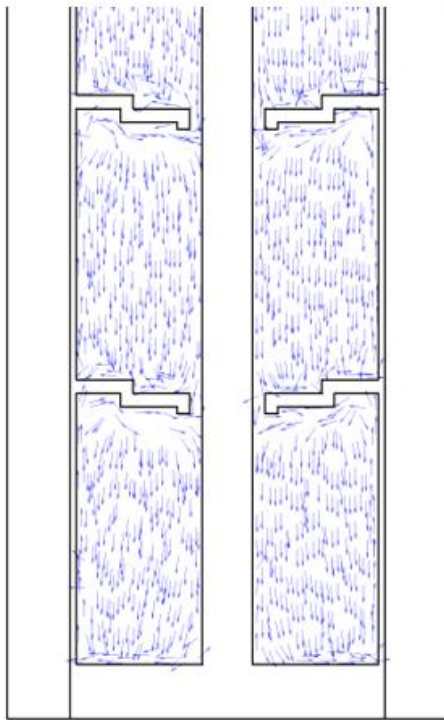
شکل (۹): نمودار تغییر کسر حجمی سیال برحسب زمان برای حالت های مختلف مورد بررسی در پژوهش حاضر (ماده تغییر فازدهنده خالص)



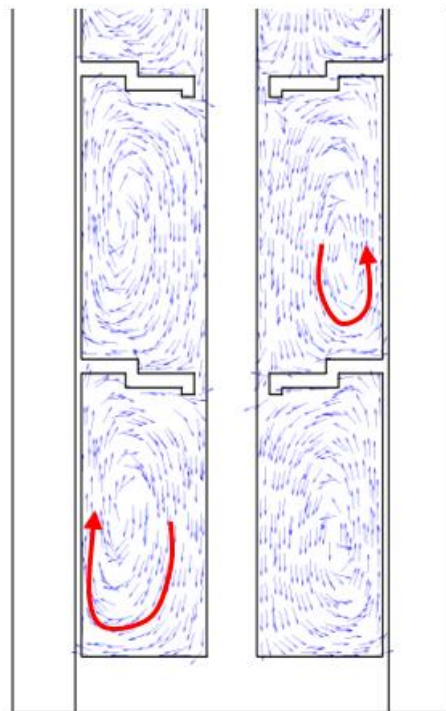
شکل (۱۲): نمودار تغییر دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده برحسب زمان برای حالات مختلف مورد بررسی در پژوهش حاضر (ماده تغییر فازدهنده در بستر متخلخل)

شکل (۱۱): نمودار تغییر دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده برحسب زمان برای حالات مختلف مورد بررسی در پژوهش حاضر (ماده تغییر فازدهنده خالص)

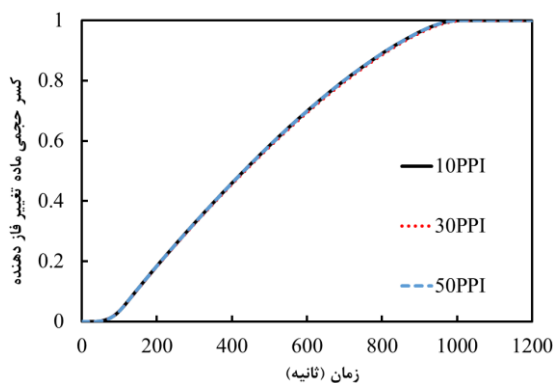
ماده تغییر فازدهنده خالص



ماده تغییر فازدهنده خالص در بستر محیط متخلخل



شکل (۱۳): مقایسه بردار سرعت برای حالت ۳ در حضور ماده تغییر فازدهنده خالص و ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل در زمان ۶۰۰ ثانیه



شکل (۱۵): تأثیر تراکم منافذ بر تغییر کسر حجمی سیال حالت ۳ بر حسب زمان (تخلخل ۹۵ درصد)

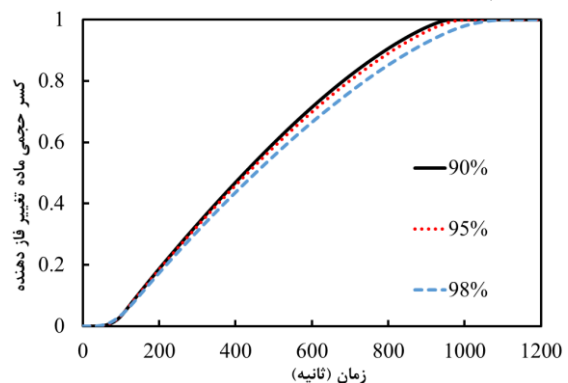
۷. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر فین‌های پله‌ای بر بهبود فرایند ذوب یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم در حضور صفحه میانی و محیط متخلخل پرداخته شد. ابتدا تأثیر تغییر اندازه و جهت فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی در حضور ماده تغییر فازدهنده خالص و همچنین ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تأثیر اندازه فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد حرارتی

۲.۶. تأثیر خواص محیط متخلخل بر فرایند ذوب

مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای قائم

تأثیر میزان تخلخل و همچنین تراکم منافذ بر فرایند ذوب حالت ۳ در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۱۴)، افزایش میزان تخلخل به دلیل کاهش انتقال حرارت سبب افزایش زمان ذوب خواهد شد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، میزان افزایش زمان ذوب در حالت تخلخل ۹۸ درصد نسبت به حالت ۹۵ درصد، ۹/۶ درصد است. همچنین مطابق با شکل (۱۵)، تأثیر تراکم منافذ بر فرایند تغییر فاز حالت ۳ بسیار ناچیز است.



شکل (۱۴): تأثیر میزان تخلخل بر تغییر کسر حجمی سیال حالت ۳

بر حسب زمان (تراکم منافذ ۱۰ PPI)

فهرست علائم

تعریف	علامت
ثابت ناحیه خمیری	A_m
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	$\rho_{ref} (kgm^{-3})$
تخلخل	ε
تراکم منافذ	ω
اندازه منافذ	d_p
قطر منافذ سلول محیط متخلخل	d_L
نفوذپذیری مواد متخلخل	$K (m^2)$
گرما ویژه محیط متخلخل	$C_{p,por} (J/kg.k)$
گرما ویژه مواد تغییر فازدهنده	$C_{p,pcm} (J/kg.k)$

سیستم به مراتب برجسته تر از جهت فین های پله ای در حالت ماده تغییر فازدهنده خالص است.

در حالت ۶ و در حضور ماده تغییر فازدهنده خالص، افزایش اندازه فین سبب کاهش زمان ذوب به میزان ۱۷/۴۸ درصد و افزایش انرژی حرارتی ذخیره شده به میزان ۱۹/۷۹ درصد نسبت به حالت ۵ گردید. همچنین افزایش اندازه فین های پله ای، سبب کاهش میزان تأثیر جهت فین های پله ای بر بهبود عملکرد حرارتی در حالت ماده تغییر فازدهنده خالص گردید. در حالت ماده تغییر فازدهنده در بستر محیط متخلخل، تأثیر مشخصات هندسی و جهت فین های پله ای بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم بسیار ناچیز است. با توجه به غالب بودن فرایند انتقال حرارت رسانش بر جابه جایی در زمان های ابتدایی فرایند تغییر فاز، در حالت ۳ افزودن محیط متخلخل سبب افزایش گرادیان دما و در نتیجه کاهش قابل توجه زمان ذوب (۶۵/۹۸ درصد) و افزایش میزان انرژی حرارتی ذخیره شده (۱۶۶/۶۹ درصد) نسبت به حالت ماده تغییر فازدهنده خالص گردید. همچنین با توجه به غالب بودن انتقال حرارت جابه جایی بر انتقال حرارت رسانش در زمان های میانی و همچنین کاهش سطح تبادل انتقال حرارت در لبه داخلی مبدل حرارتی، افزایش تراکم فین های پله ای در لبه داخلی و پایینی سیستم ذخیره انرژی می تواند راهکاری برای بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی محسوب گردد. در نهایت، تأثیر مشخصات محیط متخلخل از جمله میزان تخلخل و تراکم منافذ بر فرایند تغییر فاز مبدل حرارتی بررسی شد. افزایش میزان تخلخل سبب افزایش زمان ذوب گردید، در حالی که تأثیر تراکم منافذ بر بهبود فرایند تغییر فاز بسیار ناچیز بود.

مراجع

- [1] Khanlari, A., Aytac, I., Tuncer, A.D., Variyenli, H.I., 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", J Energy Storage, Vol. 90, pp. 111847, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111847>.
- [2] NematpourKeshтели, 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, pp. 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", Appl Therm Eng, 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] Jafarian, M., Omid, M., Khanali, M., Mokhtari, M., "Investigation of the Effect of Copper and Aluminiumoxide Nanoparticles on the Thermal Energy Storage Capability of Phase Change Material", *Energy Engineering and Management*, Vol. 10, pp. 78–89, 2023. <https://doi.org/10.22052/10.3.78>.
- [6] Dinker, A., Agarwal, M., Agarwal, G.D., "Heat storage materials, geometry and applications: A review", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 90, pp. 1–11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.10.002>.
- [7] Wang, K., Vafai, K., Li, P., Cen, H., "Forced Convection in a Bidisperse Porous Medium Embedded in a Circular Pipe", *J Heat Transfer*, Vol. 139, 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4036574>.
- [8] Mohammed, H.I., Talebizadehsardari, P., Mahdi, J.M., Arshad, A., Sciacovelli, A., Giddings, D., "Improved melting of latent heat storage via porous medium and uniform Joule heat generation", *J Energy Storage*, Vol. 31, pp. 101747, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101747>.
- [9] Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degève, J., Lv, Y., "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects", *Prog Energy Combust Sci*, Vol. 53, pp. 1–40, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.003>.
- [10] Nomura, T., Okinaka, N., Akiyama, T., "Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage", *Mater Chem Phys*, Vol. 115, pp. 846–850, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.02.045>.
- [11] Liu, Z., Yao, Y., Wu, H., "Numerical modeling for solid–liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage", *Appl Energy*, Vol. 112, pp. 1222–1232, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.022>.
- [12] 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>.
- [13] 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", *Appl Therm Eng*, Vol. 167, pp. 114777, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114777>.
- [14] Jaberi, A., Hossainpour, S., Kiyoumarsioskouei, A., "The impact of utilizing porous fins on the performance of PCM melting process in a horizontal Latent Heat Thermal Energy Storage", *J Energy Storage*, Vol. 97, pp. 112893, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112893>.
- [15] Buonomo, B., Manca, O., Nardini, S., Plomitallo, R.E., "Numerical study on latent heat thermal energy storage system with PCM partially filled with aluminum foam in local thermal equilibrium", *Renew Energy*, Vol. 195, pp. 1368–1380, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.122>.
- [16] Saini, P., Dhar, A., Powar, S., Doddamani, M., "Cesaro fins parametric optimization for enhancement in the solidification performance of a latent heat storage system with combined fins, foam, and nanoparticle", *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 5670–5687, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.375>.
- [17] Iranmanesh, A., Moshizi, S. A., "Enhancing melting and solidification characteristics of a triple-pipe latent heat energy storage system via a wavy central wall with a sinusoidal fixed wavelength", *J Energy Storage*, Vol. 79, pp. 110218, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110218>.
- [18] Abdi, A., Martin, V., Chiu, J.N.W., "Numerical investigation of melting in a cavity with vertically oriented fins", *Appl Energy*, Vol. 235, pp. 1027–1040, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.025>.
- [19] Nakhchi, M.E., Esfahani, J.A., "Improving the melting performance of PCM thermal energy storage with novel stepped fins", *J Energy Storage*, Vol. 30, pp. 101424, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101424>.
- [20] Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M., "Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array", *Renew Energy*, Vol. 35, pp. 198–207, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.010>.
- [21] 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", *J Energy Storage*, Vol. 56, pp. 105982, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105982>.

- [22] 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 Convers Manag, Vol. 74, pp. 223-236, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.003>.
- [23] Mahdi, J.M., Nsofor, E.C., "Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination", Appl Energy, Vol. 191, pp. 22-34, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.036>.
- [24] 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", Appl Energy, Vol. 137, pp. 758-772, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.004>.