

Effect of Geometry Features and Nanoparticles on the Melting Behavior of Phase Change Materials in a Finned Energy Storage Chamber

Yousef Dorbidi¹, AmirHossein Jazari Mamoei¹, Somayeh Davoodabadi Farahani^{2*} 

¹ Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: June 02, 2025

Revised: August 06, 2025

Accepted: August 16, 2025

ePublished: September 14, 2025

ABSTRACT

phase change material (PCM)-based thermal energy storage systems. The examined factors include fin spacing, incorporation of aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles into the PCM, fin material (aluminum, copper, titanium), and enclosure geometry (rectangular, square, triangular, and parallelogram). Reducing fin spacing improved heat transfer during early melting stages; however, excessively small spacing (e.g., 5 mm) restricted natural convection, reducing the melting rate in later stages. Optimal performance was achieved with aluminum fins at 7.5–10 mm spacing, balancing conduction and convection. Adding Al_2O_3 nanoparticles increased the PCM's effective thermal conductivity and reduced total melting time by up to 5%. Fin material analysis showed that aluminum and copper, due to higher thermal conductivities, outperformed titanium. Aluminum fins offered the best compromise between performance, weight, and cost. Enclosure geometry also played a significant role: the rectangular design yielded the shortest melting time, reducing it by 60% compared to the square, 44% compared to the triangular, and 34% compared to the parallelogram enclosures. This improvement is attributed to better fin distribution and more efficient natural convection flow within the rectangular chamber. Overall, the results provide practical guidelines for optimizing PCM-based thermal storage systems, especially for engineering applications requiring efficient heat management.

Keywords: Phase Change Material, Fin, Nanofluid, Melting Process, Geometry

How to cite this article

Dorbidi Y, Jazari Mamoei A.H, Davoodabadi Farahani S, Effect of geometry features and nanoparticles on the melting behavior of phase change materials in a finned energy storage chamber. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(07):439-451.

*Corresponding author's email: sdfarahani@arakut.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-1231-1538



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مطالعه عددی تاثیر ویژگی‌های هندسی و افزودن نانوذرات بر عملکرد انتقال حرارت مواد تغییر فازدهنده

یوسف دربیدی^۱، امیرحسین جازاری معمولی^۱، سمیه داوودآبادی فراهانی^{۲*} 

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

در این پژوهش، تأثیر چندین عامل کلیدی بر بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده (PCM) به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای تحلیل شده شامل گام پرها، افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به PCM، جنس پرها (آلومینیوم، مس و تیتانیوم) و شکل هندسی محفظه (مستطیلی، مربعی، مثلثی و متوازی‌الاضلاع) بودند. نتایج نشان داد کاهش گام پرها، ضمن افزایش نرخ انتقال حرارت در مراحل اولیه ذوب، در گام‌های بسیار کوچک (۵ میلی‌متر) به دلیل محدودیت فضای جریان همرفت طبیعی، منجر به کاهش سرعت ذوب در مراحل بعدی می‌شود. بهترین عملکرد در گام‌های ۷.۵ و ۱۰ میلی‌متر با جنس آلومینیوم مشاهده شد که تعادل مناسبی میان هدایت حرارتی و جریان همرفت برقرار می‌کند. همچنین افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به PCM موجب افزایش هدایت حرارتی موثر و کاهش زمان ذوب تا حدود ۵٪ گردید. تحلیل جنس پرها نشان داد که پره‌های آلومینیومی و مسی به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، زمان ذوب کمتری نسبت به تیتانیومی‌ها دارند و آلومینیوم به دلیل تعادل هزینه، وزن و هدایت حرارتی، گزینه‌ای مطلوب است. از سوی دیگر، شکل هندسی محفظه تأثیر چشمگیری بر فرآیند ذوب داشته و محفظه مستطیلی با بهبود ۶۰٪ نسبت به مربع، ۴۴٪ نسبت به مثلث و ۳۴٪ نسبت به متوازی‌الاضلاع، بهترین عملکرد را نشان داد که ناشی از توزیع بهینه پرها و فضای مناسب برای جریان‌های همرفت طبیعی است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان راهنمایی کاربردی در طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده، به ویژه در کاربردهای مهندسی انرژی، مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

کلیدواژه‌ها: ماده تغییر فازدهنده، پره، نانو سیال، فرآیند ذوب، هندسه

نحوه ارجاع به این مقاله

دربیدی یوسف، جازاری معمولی امیرحسین، داوودآبادی فراهانی سمیه، مطالعه عددی تاثیر ویژگی‌های هندسی و افزودن نانوذرات بر عملکرد انتقال حرارت مواد تغییر فازدهنده، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۵۱-۴۳۹-۴۰۷(۰۷):۱۴۰۴

* پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: sdfarahani@arakut.ac.ir

* شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: ۱۵۳۸-۱۲۳۱-۰۰۰۳-۰۰۰۰



با وجود مزایای مواد تغییر فازدهنده، هدایت گرمایی پایین آن‌ها چالشی اساسی است که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و افزایش زمان ذوب و انجماد می‌شود. برای رفع این مشکل، محققان از سطوح گسترش‌یافته (پره‌ها) استفاده می‌کنند تا سطح تماس افزایش یافته و نرخ انتقال حرارت بهبود یابد [۱۰].

برای بهره‌برداری مؤثر از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، انتخاب مناسب مواد تغییر فازدهنده و طراحی بهینه سازوکار انتقال حرارت از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از PCM‌ها، هدایت حرارتی پایین آن‌هاست که منجر به نرخ انتقال حرارت محدود و زمان طولانی‌تر برای فرآیندهای ذوب و انجماد می‌شود. این مسئله می‌تواند عملکرد سیستم را به‌ویژه در کاربردهایی که به پاسخ حرارتی سریع نیاز دارند، کاهش دهد. بنابراین، بهبود انتقال حرارت بین سیال حامل انرژی و ماده تغییر فاز ضروری است. استفاده از راهکارهایی مانند افزودن پره‌های هادی حرارت، تقویت ساختار محفظه، یا بهره‌گیری از نانوذرات می‌تواند به‌طور مؤثری باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و ارتقاء کارایی کلی سیستم شود.

تائو و همکاران [۱۱] سه روش اصلی برای افزایش انتقال حرارت معرفی کرده‌اند: افزایش سطح تبادل حرارتی، افزایش هدایت حرارتی موثر مواد تغییر فازدهنده کامپوزیتی، و ارتقای یکنواختی فرآیند. لیم و همکاران [۱۲] به این نکته اشاره کرده‌اند که سیستم‌های چندگانه می‌توانند ۱/۳ برابر توان خروجی بیشتری نسبت به سیستم‌های تک فازی داشته باشند. یکی از روش‌های موثر برای افزایش رسانایی، پراکندن نانو مواد مانند نانولوله‌های کربنی [۱۳] و نانوذرات [۱۴] در ماده تغییر فازدهنده است. استفاده از سطوح کشیده مانند ساختارهای پره‌دار [۱۵ و ۱۶] نیز می‌تواند به طور قابل توجهی سرعت ذوب را افزایش دهد. ساختارهای پره‌دار مستقیم و غیرمستقیم [۱۷] ارزان‌تر و محکم‌تر از کپسول‌های توخالی هستند. مقاله [۱۸] نشان می‌دهد که پره‌های مستقیم، اگر به خوبی طراحی شوند، می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به پره‌های غیرمستقیم گران‌قیمت داشته باشند. همچنین تحقیقات عددی و تجربی برای بهینه‌سازی پارامترهای پره مانند فاصله و طول پره‌ها انجام شده است که نشان می‌دهد پره‌های بلندتر و نازک‌تر می‌توانند سرعت ذوب را افزایش دهند. طلعتی و همکاران [۱۹] به بررسی فرآیندهای انجماد و ذوب مواد تغییر فاز دهنده با در نظر گرفتن اثرات جابجایی طبیعی در فاز مایع پرداختند. در این مطالعه، یک مخزن مستطیلی با ماده تغییر فاز دهنده و پره‌هایی برای افزایش انتقال گرما در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که جابجایی طبیعی در فرآیند انجماد تأثیر زیادی ندارد، اما در فرآیند ذوب، این اثرات زمان لازم برای ذوب کامل ماده را کاهش می‌دهد. کامکاری و همکاران [۲۰] فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در محفظه مستطیلی را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. تاثیر زاویه قرارگیری محفظه بر تشکیل ساختارهای جریان جابجایی آزاد

۱- مقدمه

نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در بازار طی سال‌های اخیر، به دلیل کاهش منابع فسیلی و تغییرات اقلیمی افزایش یافته است [۱]. اما ماهیت متناوب این انرژی‌ها باعث عدم تطابق عرضه و تقاضا می‌شود. به عنوان نمونه، انرژی خورشیدی فقط در روز در دسترس است، در حالی که نیاز به انرژی در شب یا هوای ابری بیشتر است. برای رفع این مشکل، روش‌هایی مانند ذخیره انرژی به شکل الکتریسته [۲] از طریق باتری‌های لیتیوم یون [۳] یا جریان [۴]، هیدروژن [۵]، هوای مایع فشرده [۶] و گرما [۷] پیشنهاد شده است. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی از طریق انرژی گرمایی نهان [۸ و ۹]، به دلیل هزینه پایین، گزینه‌ای جذاب محسوب می‌شود. چالش اصلی، هدایت حرارتی ضعیف مواد تغییر فازدهنده است که سرعت انتقال حرارت را محدود می‌کند. برای بهبود این عملکرد، استفاده از تکنیک‌هایی مانند سطوح گسترش‌یافته (پره‌ها) ضروری است. مواد تغییر فازدهنده دسته‌ای از ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب، ذخیره و آزادسازی مقادیر قابل‌توجهی از انرژی گرمایی را در قالب گرمای نهان طی فرآیند تغییر فاز از جامد به مایع یا بالعکس دارند. در جریان این تغییر فاز، ماده گرما را از محیط جذب کرده یا به آن پس می‌دهد، بدون آن‌که دمای آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر کند. یکی از ویژگی‌های برجسته این مواد، توانایی انجام هزاران چرخه تغییر فاز بدون افت محسوس در ظرفیت ذخیره‌سازی گرمایی یا بروز تغییرات شیمیایی ناخواسته است.

در مقایسه با مواد ذخیره‌کننده گرمای محسوس، مواد تغییر فازدهنده دارای چگالی انرژی گرمایی بسیار بالاتری هستند، زیرا می‌توانند مقدار زیادی انرژی را در یک دمای تقریباً ثابت جذب یا آزاد نمایند. این ویژگی، آن‌ها را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهایی بدل کرده است که نیازمند تنظیم دما، افزایش کارایی حرارتی و مدیریت انرژی حرارتی در حجم محدود هستند.

عملکرد مناسب مواد تغییر فازدهنده در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، به مجموعه‌ای از خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بستگی دارد؛ از جمله گرمای نهان بالا، دمای مناسب برای تغییر فاز، رسانایی گرمایی، پایداری شیمیایی در برابر چرخه‌های مکرر حرارتی، و قابلیت سازگاری با مواد دیگر. بسته به نوع کاربرد، گاهی نیاز است ماده‌ی مورد استفاده دارای رسانایی گرمایی بالا (برای تسریع در انتقال حرارت) یا پایین (برای کنترل جریان حرارت) باشد. افزون بر این، طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان نیازمند شناخت دقیق رفتار ترموفیزیکی این مواد در شرایط عملیاتی و ارزیابی جنبه‌های اقتصادی و مهندسی آن‌هاست. در مجموع، انتخاب صحیح مواد تغییر فازدهنده و چگونگی به‌کارگیری آن‌ها نقش بسزایی در کارایی، پایداری و مقیاس‌پذیری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی ایفا می‌کند.

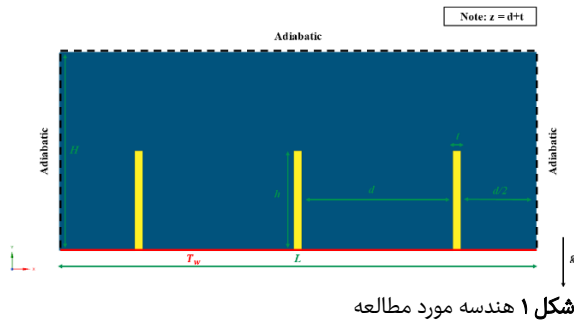


Fig. 1 Studied geometry

میان‌پره‌ای (d) و ضخامت پره (t) تعریف می‌شود. ویژگی‌های ترموفیزیکی اسید لوریک در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، شکل ۲ و جدول ۱ به‌ترتیب شامل نمای شماتیک پیکربندی‌های مختلف و مشخصات هندسی حالت‌های بررسی‌شده در این تحقیق هستند.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

به منظور ساده کردن محاسبات عددی، چندین فرض انجام شده است: (۱) حرکت ماده تغییر فاز ذوب شده به عنوان جریان آرام تراکم‌ناپذیر نیوتنی در نظر گرفته می‌شود. (۲) تقریب بوزینسک برای مدل‌سازی همرفت طبیعی انجام می‌شود. (۳) خواص ترموفیزیکی پرها و ماده تغییر فاز وابسته به دما هستند. در حالی که خواص ماده تغییر فاز به حالت‌های فاز بستگی دارد. معادلات حاکم در رابطه با پیوستگی جرم، بقایای تکانه x و y برای توصیف جریان همرفتی ماده تغییر فازدهنده ذوب شده در طول ذوب به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = \\ - \frac{\partial P}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \sigma)} u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \\ - \frac{\partial P}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \rho \beta g (T - T_m) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = - \vec{\nabla} P + \nabla (\mu_f \nabla \vec{V}) + \\ A u \frac{(1-\Omega)^2}{(\Omega^3 + 0.001)} \vec{V} + \rho \beta \vec{g} - c \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \sigma)} v \end{aligned} \quad (4)$$

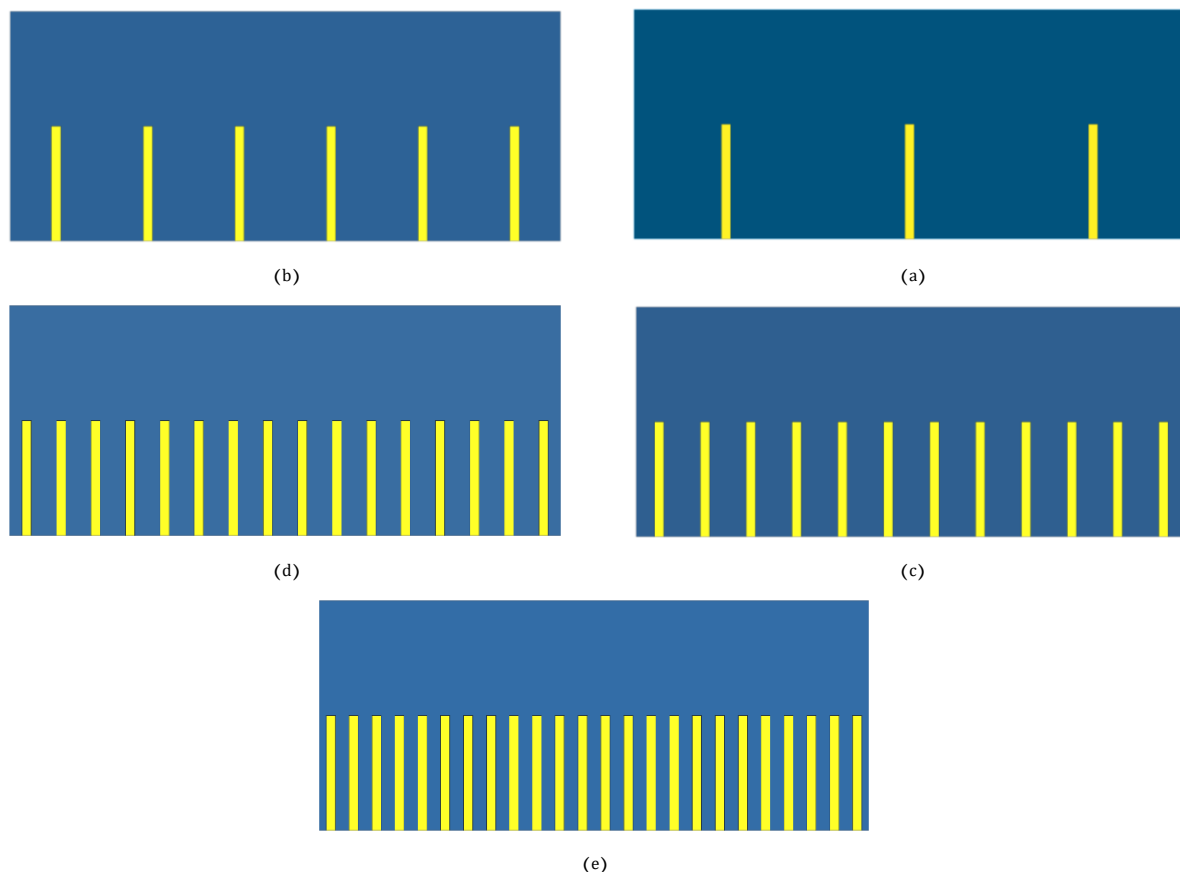
در فاز مایع و اثر آن بر نرخ ذوب ماده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش زاویه محفظه از ۹۰° به ۴۵° و ۰° زمان ذوب را به ترتیب ۵۲٪ و ۳۷٪ کاهش می‌دهد، که این کاهش به دلیل ظهور جریان‌های گردابه‌ای و تشکیل توده‌های حرارتی در فاز مایع است. ژانگ و همکاران [۲۱] نشان دادند که سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان با مبدل حرارتی لوله‌پره‌دار حاوی ماده تغییر فازدهنده، زمان ذوب و انجماد را تا ۴۶٪ و ۳۵٪ با افزایش هدایت حرارتی کاهش می‌دهد.

با وجود تلاش‌های گسترده در بهینه‌سازی سامانه‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان مجهز به پره، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین صرفاً محدود به شرایط خاص آزمایشگاهی، نوع مشخصی از ماده‌ی تغییر فازدهنده و یا پیکربندی‌های خاصی از پرها بوده‌اند. از این‌رو، همچنان نیاز به انجام پژوهش‌هایی جامع و نظام‌مند در راستای تدوین دستورالعمل‌های طراحی مؤثر و کاربردی در این حوزه احساس می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار حرارتی یک سامانه‌ی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی شامل ماده‌ی تغییر فازدهنده درون یک محفظه‌ی مستطیلی که از کف به‌صورت همدمای گرم می‌گردد، مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی این سامانه شامل استفاده از پره‌های عمودی مستقیم از جنس آلومینیوم به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی انتقال حرارت است. از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به تحلیل تأثیر گام پرها، افزودن نانوذرات به ماده‌ی تغییر فازدهنده، بررسی جنس پرها و نیز تحلیل اثر هندسه‌ی محفظه بر عملکرد حرارتی سامانه اشاره نمود. ساختار مقاله به‌شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، مواد و روش‌های مورد استفاده معرفی می‌گردند. در بخش سوم، معادلات حاکم، شرایط مرزی و اولیه مدل فیزیکی ارائه می‌شود. بخش چهارم به تشریح روش عددی حل و تحلیل استقلال شبکه اختصاص دارد. اعتبارسنجی نتایج عددی در بخش پنجم انجام می‌گیرد. در بخش ششم، نتایج حاصل مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت، بخش هفتم به جمع‌بندی یافته‌ها و ارائه‌ی نتیجه‌گیری کلی اختصاص یافته است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک محفظه‌ی مستطیلی حاوی ماده تغییر فازدهنده (PCM) به‌صورت همدمای مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد هندسی محفظه شامل ارتفاع (H) برابر با ۵۰ میلی‌متر و طول (L) برابر با ۱۲۰ میلی‌متر است. در این مطالعه، از اسید لوریک به‌عنوان ماده‌ی تغییر فازدهنده استفاده شده است.

به‌منظور کاهش مقاومت حرارتی درون ماده‌ی تغییر فازدهنده و بهبود نرخ انتقال حرارت، از پره‌های عمودی آلومینیومی با ابعاد $h \times t$ به‌عنوان تقویت‌کننده‌های حرارتی بهره گرفته شده است. شماتیک هندسی مدل مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که گام پره (z) به‌صورت مجموع فاصله‌ی



شکل ۲ هندسه‌های مختلف مورد مطالعه (الف) 3 fin, h=2.5, z=40 (ب) 6 fin, h=2.5, z=40 (پ) 12 fin, h=2.5, z=40 (ت) 16 fin, h=2.5, z=40 (ث) 3 fin, h=2.5, z=40

Fig. 2 Various studied geometries

جدول ۱ حالت‌های مطالعه شده

Table 1 Studied cases

Case	Number of Fins	Fin pitch (z)	Fin length (h)	Fin thickness (t)
1	3	40	25	4
2	6	20	25	2
3	12	10	25	1
4	16	7.5	25	0.75
5	24	5	25	0.5

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی مسئله

Table 2 Thermophysical Properties of the Materials

Material properties	Lauric acid	Aluminum	Al2O3	Copper	Titanium
Density (kg/m ³)	885	2700	3600	8978	4850
Thermal conductivity (W/mK)	0.14	130	36	381	544.25
Specific heat capacity (J/kgK)	2390	900	765	387.6	7.44
Coefficient of thermal expansion (1/K)	0.0008	-----	0.0000085	-----	-----
Dynamic viscosity (Pa.s)	0.0059	-----	-----	-----	-----
Melting/freezing temperature (K)	-316.65 321.35	-----	-----	-----	-----
Latent heat (J/kg)	187210	-----	-----	-----	-----

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{if } T \geq T_l \\ 0 & \text{if } T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{if } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5)$$

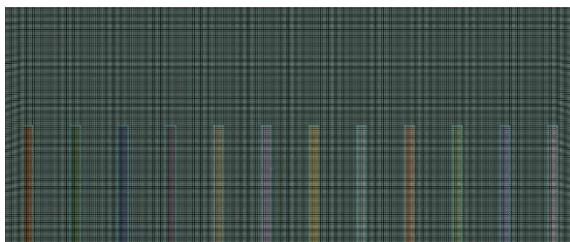
که در آن T_s و T_l به ترتیب دمای جامد و مایع هستند. روش آنتالپی برای محاسبه انتقال حرارت در ماده تغییر فازدهنده استفاده می‌شود که به معادله (۶) است:

در معادله (۲) و (۳)، آخرین عبارت برای تکانه با استفاده از معادله Carman-Kozeny برای جریان در یک محیط متخلخل استفاده می‌شود. C ثابت ناحیه خمیری است که مقدار آن بین 10^4 تا 10^7 است و σ عدد کوچکی (۰/۰۰۳) است که برای جلوگیری از تقسیم بر صفر استفاده می‌گردد و همچنین γ کسر ذوب است. کسر ذوب را می‌توان به صورت معادله (۵) محاسبه نمود:

در فرآیند گسسته‌سازی مکانی، ترم‌های انتشاری با استفاده از روش تفکیک مرکزی مرتبه دوم و ترم‌های همرفتی با بهره‌گیری از طرح کوپیک (QUICK) مدل‌سازی شده‌اند. طرح کوپیک به دلیل ویژگی‌های عددی خاص خود، قادر است گرادیان‌های تند متغیرهایی نظیر دما و سرعت را با دقت مطلوب بازنمایی نماید. جهت تعیین دقیق میدان فشار، از گزینه‌ی پرستو (PRESTO) استفاده شده و به منظور برقراری کوپل مؤثر میان میدان‌های فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) بهره گرفته شده است. این الگوریتم، که ماهیتی نیمه‌ضمنی و پایدار دارد، از کارایی بالایی در حل مسائل جریان سیال برخوردار است.

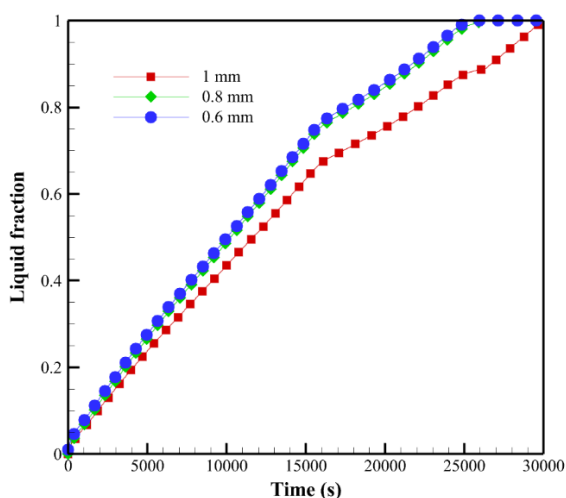
در کلیه شبیه‌سازی‌ها، گام زمانی برابر با ۰/۱ ثانیه و اندازه‌ی المان شبکه برابر با ۰/۵ میلی‌متر لحاظ شده است که منجر به تولید شبکه‌ای با تقریباً ۲۴۰۰۰ سلول مربعی گردیده است. به منظور مدل‌سازی دقیق ناحیه‌ی خمیری در فرآیند ذوب همراه با جابجایی طبیعی، مقدار عدد ثابت ناحیه‌ی خمیری برابر با ۵۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ نمایی از شبکه‌ی تولیدشده را نمایش می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از شکل ۴ حاکی از آن است که در صورت استفاده از اندازه‌ی شبکه‌ای کمتر از ۰/۸ میلی‌متر، دقت و قابلیت اطمینان نتایج عددی به‌طور محسوسی افزایش خواهد یافت.



شکل ۳ شبکه‌بندی انجام شده

Fig. 3 Mesh configuration used in the simulations



شکل ۴ نمودار استقلال شبکه

Fig. 4 Grid independence study

$$\frac{\partial(\rho_{PCM}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{PCM}uh)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{PCM}vh)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(k_{PCM}\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{PCM}\frac{\partial T}{\partial y}) \quad (6)$$

که در آن آنتالپی کل ماده تغییر فازدهنده به عنوان مجموع آنتالپی محسوس و گرمای نهان محاسبه می‌شود، یعنی:

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

در مورد انتقال حرارت از طریق پره‌های مستقیم فلزی، تعادل هدایت ذخیره‌سازی منجر به معادله حاکم می‌شود که به صورت فرمول (۸) شده است:

$$(\rho C_p)_{fin} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{fin} (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \quad (8)$$

هنگامی که نانوذرات به سیال اضافه می‌شوند، تمامی خواص سیال در معادلات حاکم با خواص مخلوط نانو سیال جایگزین می‌شوند. فرضیاتی که در شبیه‌سازی برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانو سیال لحاظ شده است عبارتند از [۲۲]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (9)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (11)$$

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)(k_{bf} - k_{np})\phi}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})\phi} k_{bf} \quad (12)$$

$$(\rho\tau)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\tau)_{bf} \quad (13)$$

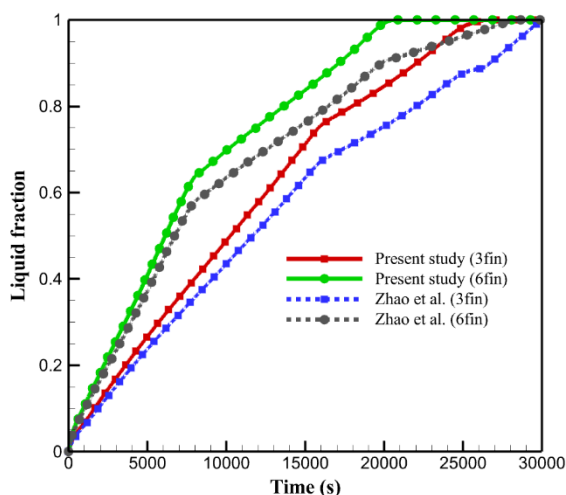
$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_{np} \quad (14)$$

که ϕ, μ, τ, β به ترتیب، ضریب انبساط حرارتی، گرمای نهان، لزجت و کسر حجمی هستند. همچنین n مربوط به ضریب شکل نانوذرات می‌باشد که برای نانوذرات کروی برابر ۳ است.

برای هندسه مورد مطالعه، دیواره پایینی محفظه به صورت همدمای با دمای ثابت $T_w = 435.15K$ گرم می‌شود، در حالی که سه دیوار دیگر عایق هستند. دمای اولیه (۲۹۸/۱۵K) به طور یکنواخت در حوزه محاسباتی اعمال می‌شود. دما و شار حرارتی پیوسته در نظر گرفته شده است. از فرض عدم لغزش بر روی همه دیوارها استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که مقدار دمای دیواره بر اساس کار آزمایشی انتخاب می‌شود [۲۳] و ثابت نگه داشته می‌شود.

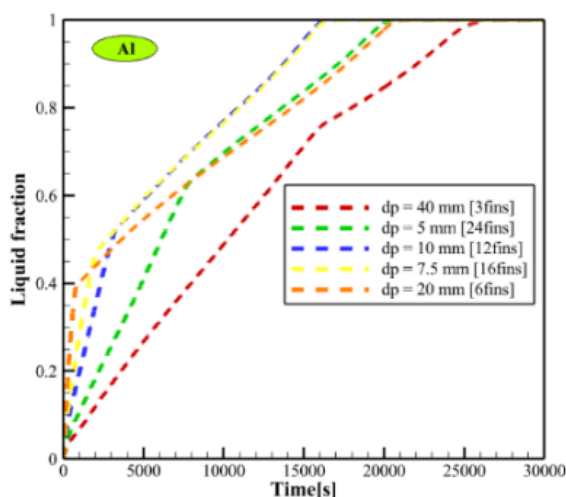
۴- روش عددی و استقلال شبکه

در این مطالعه، حل عددی معادلات حاکم با بهره‌گیری از نرم‌افزار انسیس فلوئنت و بر اساس روش حجم محدود صورت پذیرفته است. به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی فرآیندهای گذرا، از یک طرح کاملاً ضمنی برای گسسته‌سازی زمانی استفاده شده است که ضمن ارتقای پایداری عددی، امکان تحلیل زمانی با دقت مناسب را فراهم می‌آورد.



شکل ۵ نمودار اعتبارسنجی

Fig. 5 Validation of the numerical model



شکل ۶ اثر گام پره بر کسر ذوب

Fig. 6 Temporal variation of melt fraction for different fin pitches

گرفته است. این تحلیل بر اساس بهترین آرایش به‌دست‌آمده از مرحله‌ی پیشین (شامل ۱۲ پره آلومینیومی با گام ۱۰ میلی‌متر) صورت پذیرفته و نتایج آن در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند. هدف اصلی این بخش، بررسی تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر نرخ ذوب ماده PCM و همچنین تحلیل کیفی الگوی توزیع دما و فاز مایع در طول زمان است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات از $\phi=0.01$ به $\phi=0.05$ ، زمان مورد نیاز برای تکمیل فرآیند ذوب به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که کاهش زمان ذوب در این بازه حدود ۵٪ تا ۵٪ برآورد شده است. این کاهش حاکی از آن است که افزودن نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی مؤثر کل سامانه شده و در نتیجه، حرارت از منبع به لایه‌های داخلی PCM با نرخ بالاتری منتقل می‌گردد. به عبارت دیگر، مقاومت حرارتی درون ماده کاهش یافته و فرآیند انتقال انرژی بهبود یافته

۵- اعتبارسنجی

مدل محاسباتی در این مقاله از طریق مقایسه با نتایج تجربی منتشر شده در ادبیات اعتبارسنجی شد. ژائو و همکاران [۲۴] ذوب ماده تغییر فازدهنده را در واحدهای مستطیلی با و بدون پره‌های افقی به‌طور تجربی بررسی کردند. در این مقاله مدل ۳ و ۶ پره برای مقایسه و تایید انتخاب شد و تطابق خوبی با خطای ۴/۲٪ در زمان ذوب کل نسبت به مدل تجربی دارد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل فیزیکی حاضر قابل اعتماد است و قادر به پیش‌بینی عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی است.

۶- بحث و نتایج

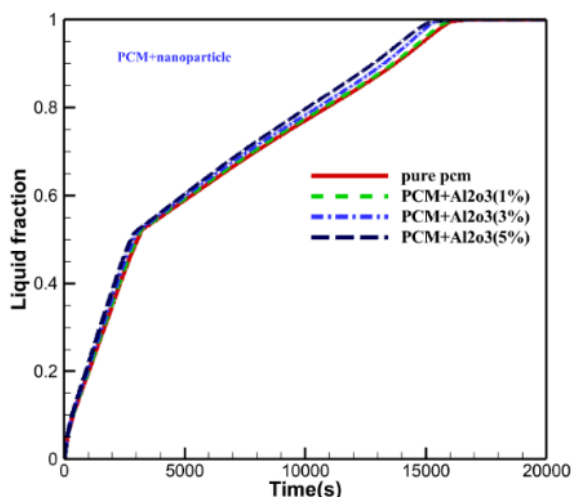
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سامانه‌ی ذخیره‌سازی گرمای نهان حاوی ماده‌ی تغییر فازدهنده با پیکربندی‌های مختلف هندسی و فیزیکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. هدف اصلی از این تحلیل، ارزیابی تأثیر عوامل مختلف نظیر گام پره‌ها، جنس پره‌ها، افزودن نانوذرات به PCM و همچنین هندسه‌ی محفظه بر فرآیند ذوب و بهبود نرخ انتقال حرارت درون سامانه بوده است.

۶-۱- اثر گام پره

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به‌منظور بررسی اثر گام پره‌ها بر فرآیند ذوب، طول پره‌ها برابر با ۲۵ میلی‌متر و جنس آن‌ها آلومینیومی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها برای گام‌های مختلف ۵، ۷/۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر انجام شده است که به‌ترتیب معادل با ۲۴، ۱۶، ۱۲، ۶ و ۳ پره در عرض محفظه می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با کاهش گام پره‌ها، سرعت ذوب ماده‌ی تغییر فازدهنده در مراحل ابتدایی افزایش می‌یابد. با این حال، این روند افزایشی تا یک حد مشخص ادامه دارد و پس از آن، کاهش بازده حرارتی مشاهده می‌شود. بهترین عملکرد حرارتی در میان حالت‌های بررسی‌شده، مربوط به گام‌های ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر با جنس آلومینیوم بوده است. افزایش بیش از حد تعداد پره‌ها (کاهش گام) می‌تواند موجب کاهش سطح مؤثر تماس PCM با پره‌ها، افزایش تراکم شبکه‌ای و در نتیجه کاهش جریان همرفت طبیعی شود که تأثیر منفی بر فرآیند ذوب خواهد داشت. انتخاب آلومینیوم به‌عنوان ماده‌ی سازنده‌ی پره‌ها به‌دلیل هدایت حرارتی بالا، نقش مؤثری در تسریع فرآیند ذوب ایفا می‌کند. در مقابل، استفاده از مواد با هدایت حرارتی کمتر موجب کند شدن نرخ انتقال حرارت و افزایش زمان ذوب می‌گردد که در نهایت منجر به کاهش کارایی حرارتی سامانه خواهد شد.

۶-۲- اثر افزودن نانو ذرات به ماده تغییر فازدهنده

در این بخش، تأثیر افزودن نانوذره آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) به ماده تغییر فازدهنده بر عملکرد حرارتی سامانه مورد بررسی قرار



شکل ۷ اثر افزودن نانوذرات به ماده تغییر فازدهنده بر روی روند ذوب
Fig. 7 Influence of nanoparticles on the melting process of the PCM

در ادامه، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای توزیع فاز ماده تغییر فازدهنده و دما در حضور پره‌های مختلف را ارائه می‌دهد که همسو با تحلیل پیشین، نشان‌دهنده سرعت ذوب بیشتر در حالت‌های پره آلومینیومی و مسی نسبت به تیتانیومی است. همچنین، بررسی کانتورهای دما و توزیع فاز مایع در این شرایط نشان می‌دهد که در زمان‌های مختلف (۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ثانیه)، ناحیه ذوب‌شده در حضور پره‌های آلومینیومی و مسی گسترش بیشتری دارد و دما به‌طور یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. این مسئله بر اساس تحلیل‌ها و نتایج حاصل از شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، تأکید می‌کند که استفاده از مواد با هدایت حرارتی بالاتر بهبود قابل توجهی در کارایی فرآیند ذوب و توزیع حرارت ایجاد می‌کند.

۴-۶- اثر تغییر شکل محفظه

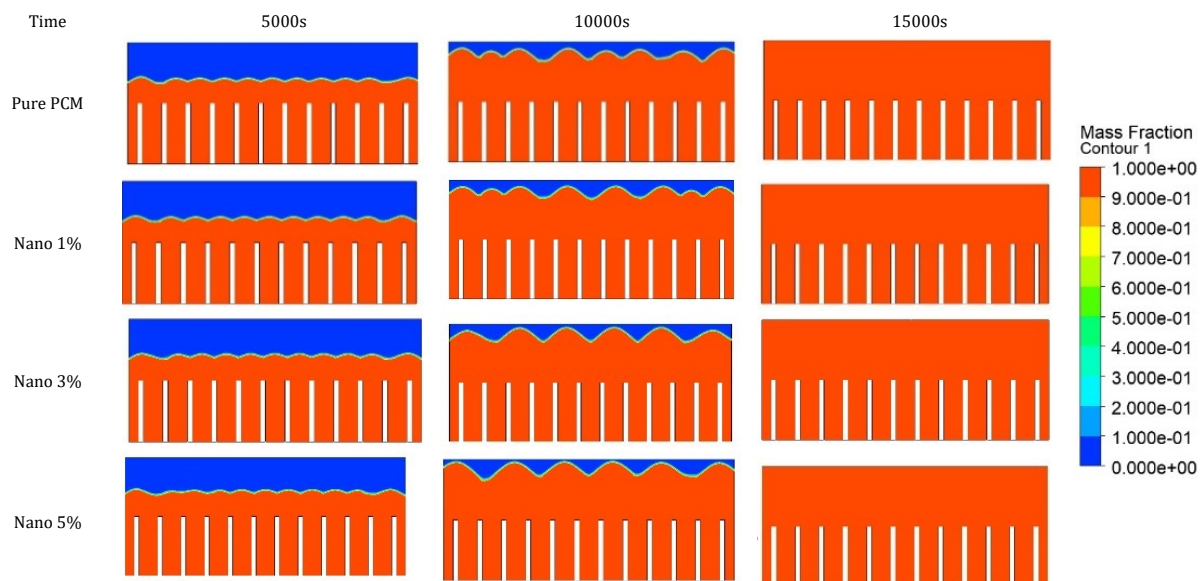
شکل ۱۴ تأثیر شکل هندسی محفظه بر فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده را در شرایطی که شامل ۱۲ پره داخلی است، مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مطالعه، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، چهار هندسه متفاوت شامل محفظه‌های مستطیلی، مربعی، مثلثی و متوازی‌الاضلاع انتخاب شده‌اند تا عملکرد حرارتی آن‌ها تحت شرایط یکسان مقایسه شود. هدف از انتخاب این اشکال، تحلیل نقش مؤلفه‌های هندسی نظیر زاویه‌ها، نحوه توزیع پره‌ها، حجم مؤثر برای جریان همرفت طبیعی و یکنواختی توزیع دما می‌باشد.

است. افزایش هدایت حرارتی، به‌ویژه در مراحل اولیه‌ی ذوب که گرادیان دما شدید است، موجب افزایش قابل‌ملاحظه در نرخ پیشروی جبهه‌ی ذوب شده و ناحیه‌ی فاز مایع با سرعت بیشتری توسعه می‌یابد.

این مسئله نه‌تنها در تسریع فرآیند شارژ حرارتی اهمیت دارد، بلکه در کاربردهای عملی مانند ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی یا تنظیم دمای تجهیزات الکترونیکی نیز می‌تواند منجر به افزایش بازدهی عملکرد حرارتی شود. همچنین، بررسی کانتورهای توزیع فاز مایع و دما در شکل‌های ۸ و ۹ به‌طور واضح نشان می‌دهد که در حضور نانوذرات، ناحیه ذوب‌شده در زمان‌های یکسان (۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ثانیه) گسترش بیشتری دارد. این امر نشان می‌دهد که علاوه‌بر کاهش زمان ذوب، یکنواختی توزیع دما نیز بهبود یافته و از شکل‌گیری نقاط دمایی سرد در نواحی مرکزی جلوگیری شده است. این پدیده در کاربردهایی که نیاز به یکنواختی حرارتی دارند، مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به PCM، در صورت کنترل مناسب کسر حجمی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر جهت افزایش نرخ پاسخ حرارتی، کاهش زمان ذوب و بهبود عملکرد کلی سامانه ذخیره‌سازی گرمای نهان مورد استفاده قرار گیرد.

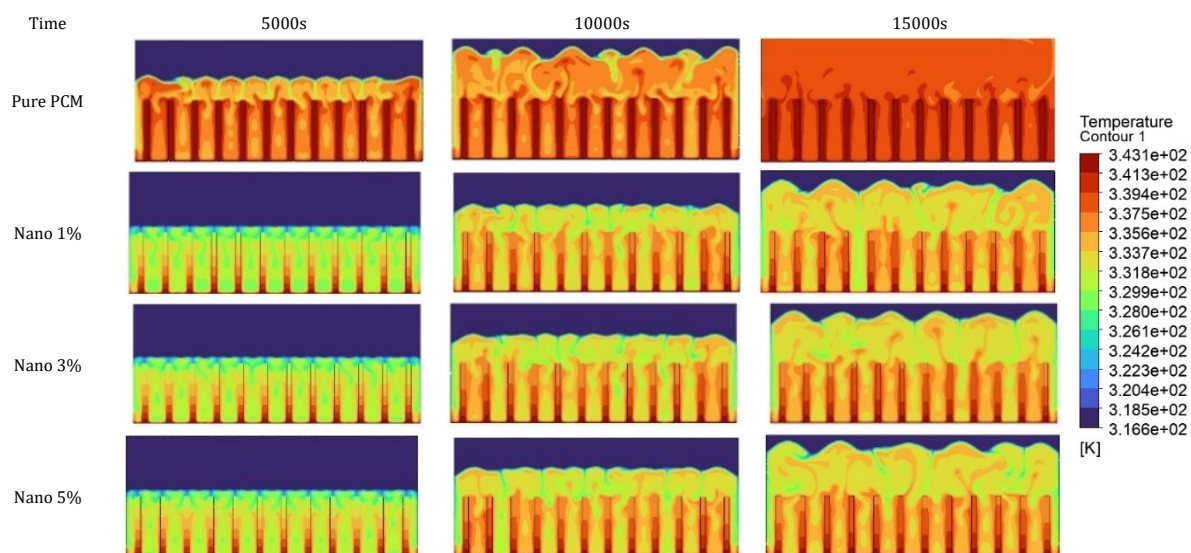
۳-۶- اثر جنس پره‌ها

نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۲ تأثیر تغییر جنس پره‌ها (آلومینیوم، مس و تیتانیوم) را بر کسر ذوب ماده تغییر فازدهنده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عملکرد پره‌های آلومینیومی و مسی بسیار مشابه است و این دو نوع پره نسبت به پره‌های تیتانیومی زمان کمتری برای ذوب کامل ماده تغییر فازدهنده نیاز دارند. این موضوع عمدتاً به دلیل هدایت حرارتی بالاتر آلومینیوم و مس است که انتقال حرارت را به‌طور مؤثری تسریع می‌کند. اگرچه تفاوت عملکرد آلومینیوم و مس در نمودار اندک به نظر می‌رسد، اما از نظر وزن کمتر و هزینه اقتصادی پایین‌تر، آلومینیوم به عنوان گزینه مطلوب‌تر در بسیاری از کاربردها مطرح می‌شود. از سوی دیگر، پره‌های تیتانیومی به دلیل هدایت حرارتی پایین‌تر (تقریباً ۲۱ وات بر متر کلونین) عملکرد ضعیف‌تری دارند و فرآیند انتقال حرارت و در نهایت ذوب ماده تغییر فازدهنده در حضور آن‌ها زمان بیشتری به طول می‌انجامد. تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب جنس پره نقش کلیدی در بهبود کارایی سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی دارد. به‌ویژه در کاربردهایی که کاهش زمان ذوب اهمیت بالایی دارد، استفاده از پره‌های با هدایت حرارتی بالا مانند آلومینیوم یا مس به‌طور واضح ترجیح داده می‌شود.



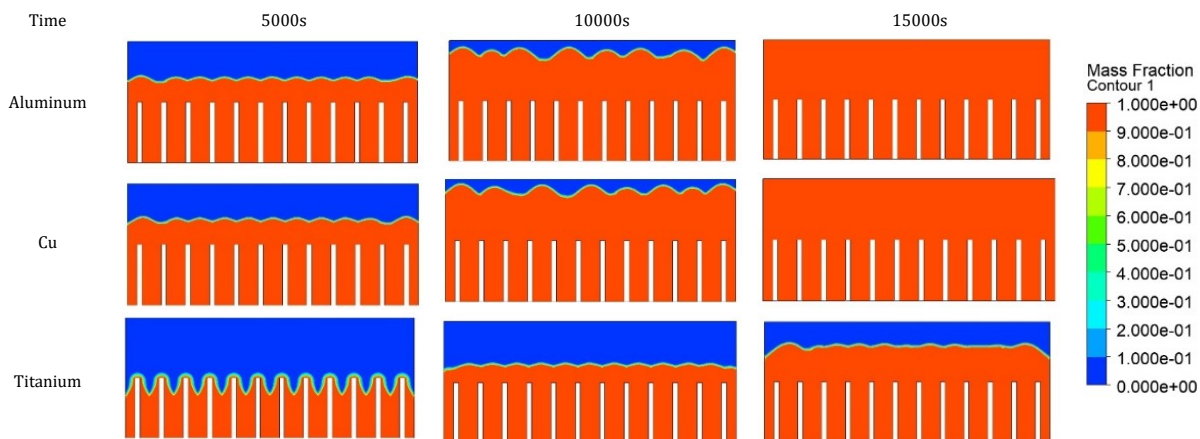
شکل ۸ اثر افزودن نانو ذره بر کانتور کسر ذوب

Fig. 8 Contour of liquid fraction illustrating the melting process with nanoparticle-enhanced PCM



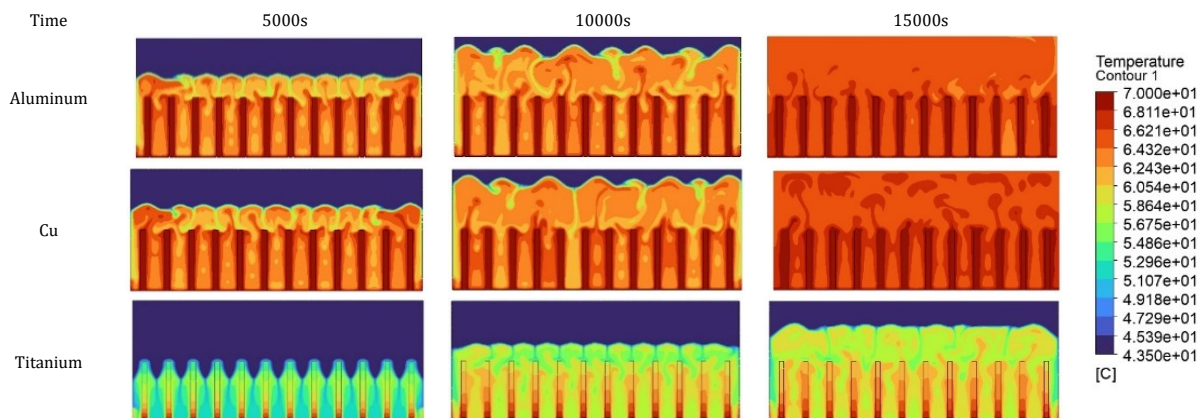
شکل ۹ اثر افزودن نانو ذره بر کانتور دما

Fig. 9 Contour of Temperature illustrating the melting process with nanoparticle-enhanced PCM



شکل ۱۰ اثر جنس پره بر کانتور کسر ذوب

Fig. 10 Contours of liquid fraction for different fin materials



شکل ۱۱ اثر جنس پره بر کانتور دما

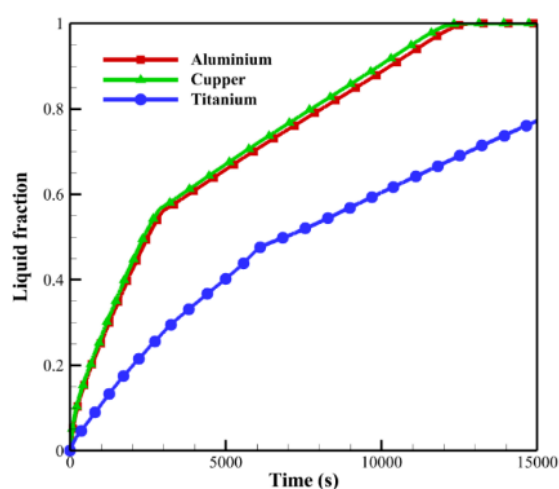
Fig. 11 Contours of Temperature for different fin materials

هندسه مثلثی به دلیل طراحی خاص خود که منجر به کاهش فضای مفید در نواحی بالایی محفظه می‌شود، توانایی کمتری در ایجاد جریان‌های مؤثر همرفتی دارد. علاوه بر این، تمرکز حرارت در بخش‌های پایینی و عدم توزیع یکنواخت دما باعث کاهش نرخ ذوب و کند شدن فرایند ذوب می‌شود.

محفظه متوازی‌الاضلاع نیز با وجود داشتن سطح مقطع مشابه، به دلیل توزیع غیریکنواخت و نامناسب پره‌ها و همچنین جهت‌گیری خاص دیواره‌ها، موجب اختلال در الگوهای جریان طبیعی شده و نرخ انتقال حرارت را در برخی نواحی کاهش می‌دهد. این عوامل نهایتاً باعث عملکرد ضعیف‌تر این هندسه نسبت به حالت‌های مستطیلی و مربعی می‌گردد.

این تحلیل به وضوح نشان می‌دهد که هندسه محفظه تأثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال حرارت، زمان ذوب و در نهایت عملکرد کلی سامانه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی دارد. انتخاب هندسه بهینه می‌تواند جریان‌های همرفت طبیعی مؤثرتری ایجاد کرده و گرما را به‌طور یکنواخت‌تری در سراسر محفظه توزیع کند.

در جمع‌بندی، هندسه مستطیلی به عنوان کارآمدترین ساختار شناسایی شده است و نسبت به هندسه‌های مربعی، مثلثی و متوازی‌الاضلاع به ترتیب بهبودهایی معادل ۶۰٪، ۴۴٪ و ۳۴٪ در کاهش زمان کل ذوب از خود نشان داده است. پس از آن، هندسه‌های متوازی‌الاضلاع، مثلثی و مربعی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. این نتایج اهمیت طراحی مناسب محفظه‌های حرارتی را در کاربردهای عملی برجسته می‌سازد و می‌تواند به عنوان مبنایی برای توسعه سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی با کارایی بالا و زمان پاسخ سریع مورد استفاده قرار گیرد.

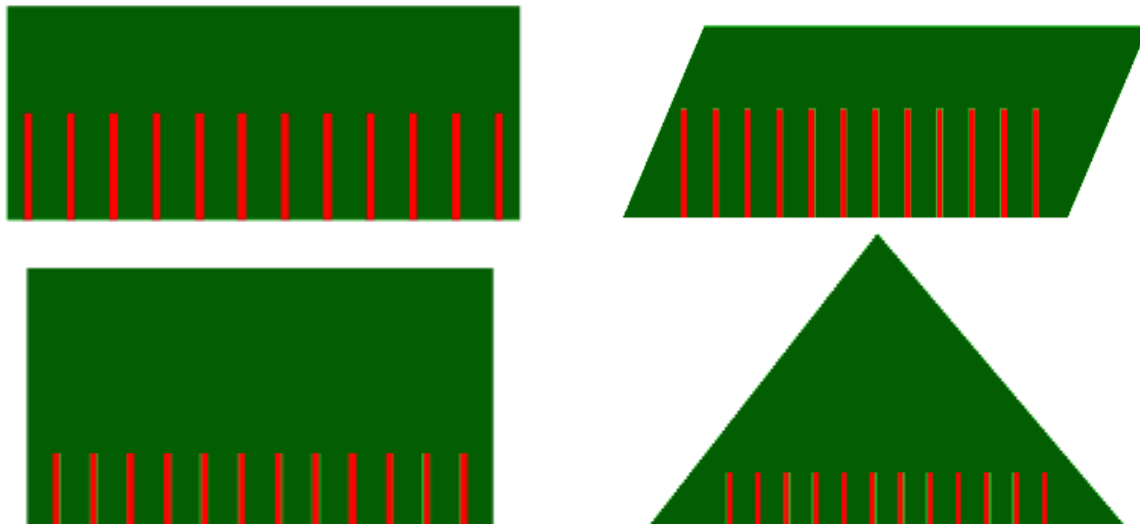


شکل ۱۲ اثر جنس پره بر نمودار کسر ذوب

Fig. 12 Liquid fraction variation for different fin materials

نتایج حاصل نشان می‌دهد که محفظه مستطیلی نسبت به سایر هندسه‌ها، عملکرد حرارتی به مراتب بهتری دارد؛ به‌گونه‌ای که کسر ذوب در آن با سرعت بیشتری افزایش یافته و زمان کلی لازم برای تکمیل فرایند ذوب کاهش می‌یابد. این عملکرد برتر عمدتاً ناشی از وجود فضای کافی برای توسعه جریان‌های همرفت طبیعی و توزیع بهینه پره‌ها در جهت انتقال مؤثر حرارت به نواحی مرکزی و فوقانی محفظه است. این عوامل منجر به افزایش انتقال حرارت و تسریع در نرخ ذوب می‌شوند.

در مقابل، محفظه مربعی با وجود تقارن هندسی و توزیع نسبتاً یکنواخت پره‌ها، به دلیل محدودیت در جهت‌گیری جریان‌های همرفتی و افزایش مقاومت حرارتی موضعی، زمان ذوب بیشتری را نسبت به محفظه مستطیلی تجربه می‌کند.



شکل ۱۳ شماتیکی از هندسه‌های ترسیم شده و مقایسه شده

Fig. 13 Schematic representation of the compared cavity geometries studied in this work

آلومینیوم بهترین تعادل بین انتقال هدایت حرارتی و جریان همرفت را ایجاد کرده‌اند.

افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به ماده تغییر فازدهنده موجب افزایش هدایت حرارتی مؤثر و کاهش زمان ذوب شده است. به طوری که افزایش کسر حجمی نانوذرات از $\phi=0.01$ به $\phi=0.05$ به ترتیب موجب کاهش زمان ذوب به میزان ۵٪ و ۵٪ شده است.

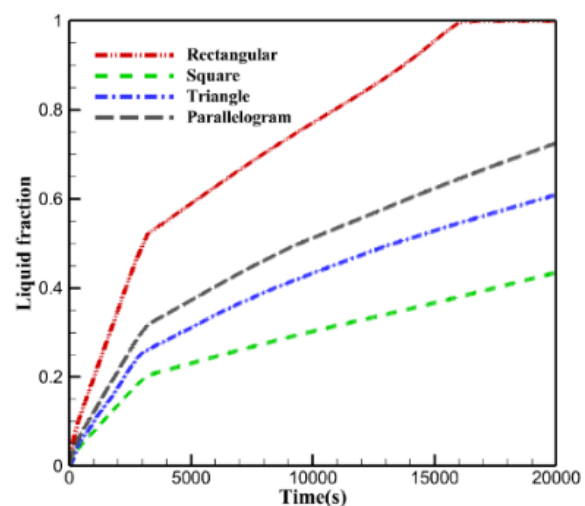
تغییر جنس پرها نشان می‌دهد که پره‌های آلومینیومی و مسی به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، زمان ذوب کمتری نسبت به پره‌های تیتانیومی دارند. با توجه به تعادل میان هزینه، وزن و هدایت حرارتی، آلومینیوم به عنوان گزینه بهینه برای بسیاری از کاربردها مطرح می‌باشد.

شکل هندسی محفظه تأثیر قابل توجهی بر نرخ ذوب دارد؛ به طوری که محفظه مستطیلی با بهبود ۶۰٪ نسبت به مربع، ۴۴٪ نسبت به مثلث و ۳۴٪ نسبت به متوازی‌الاضلاع، بهترین عملکرد را از نظر تسریع فرآیند ذوب نشان داده است. این عملکرد برتر ناشی از توزیع مناسب پرها و فراهم بودن فضای کافی برای توسعه جریان‌های همرفت طبیعی در محفظه مستطیلی است.

در مجموع، نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای طراحی بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده فراهم آورد و به افزایش کارایی و کاهش زمان پاسخ این سیستم‌ها کمک نماید.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.



شکل ۱۴ اثر شکل محفظه بر روی روند نرخ ذوب

Fig. 14 Effect of cavity shape variation on the melting rate of the phase change material

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر چندین عامل کلیدی بر بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای بررسی‌شده شامل گام پرها، افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به ماده تغییر فازدهنده، جنس پرها (آلومینیوم، مس و تیتانیوم) و شکل هندسی محفظه (مستطیلی، مربعی، مثلثی و متوازی‌الاضلاع) بوده است. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

کاهش گام پرها منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت در مراحل اولیه ذوب می‌شود، اما در گام بسیار کوچک (۵ میلی‌متر) به دلیل کاهش فضای مؤثر برای جریان همرفت طبیعی، سرعت ذوب در مراحل بعدی کاهش می‌یابد. گام‌های ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر با جنس

- metal periodic structures," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 168, p. 120853, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.12.0853>.
- [13] A. Farzanehnia, M. Khatibi, M. Sardarabadi, and M. Passandideh-Fard, "Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management," *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, pp. 314–325, 2019, doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.037>.
- [14] M. Sheikholeslami, R. Haq, A. Shafee, and Z. Li, "Heat transfer behavior of nanoparticle enhanced PCM solidification through an enclosure with V shaped fins," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 130, pp. 1322–1342, 2019, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.020>.
- [15] C. Zhao, M. Opolot, M. Liu, F. Bruno, S. Mancin, and K. Hooman, "Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 150, p. 119348, 2020, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.11.9348>.
- [16] J. Vogel and M. Johnson, "Natural convection during melting in vertical finned tube latent thermal energy storage systems," *Appl. Energy*, vol. 246, pp. 38–52, 2019, doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.011>.
- [17] C. Zhao et al., "Review of analytical studies of melting rate enhancement with fin and/or foam inserts," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 207, p. 118154, 2022, doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118154>.
- [18] P. P. Levin, A. Shitzer, and G. Hetsroni, "Numerical optimization of a PCM-based heat sink with internal fins," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 61, pp. 638–645, 2013, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.056>.
- [19] M. Taghilou and F. Talati, "Numerical investigation of natural convection effects on the melting and solidification of PCM within a rectangular finned container using LBM," *Modares Mech. Eng.*, vol. 16, no. 8, pp. 75–86, 2016 (in Persian).
- [20] B. Kamkari and M. Vahabi, "Experimental investigation and numerical simulation of thermal energy storage in phase change material under different tilt angles of the enclosure," *Modares Mech. Eng.*, vol. 17, no. 11, pp. 133–143, 2018 (in Persian).
- [21] X. Y. Zhang, Y. T. Ge, Burra, and P. Y. Lang, "Experimental investigation and CFD modelling analysis of finned-tube PCM heat exchanger for space heating," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 244, p. 122731, May 2024, doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122731>.
- [22] S. D. Farahani, A. D. Farahani, and A. H. Mosavi, "Numerical simulation of NEPCM series two-layer solidification process in a triple tube with porous fin,"
- [1] J. Yan, "Energy transition: Time matters," *Adv. Appl. Energy*, vol. 5, p. 100082, 2022, doi: <http://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100082>.
- [2] W. Ajeeb, M. S. Oliveira, N. Martins, and S. S. Murshed, "Forced convection heat transfer of non-Newtonian MWCNTs nanofluids in microchannels under laminar flow," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 127, p. 105495, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.10.5495>.
- [3] K. Moy, S. B. Lee, S. Harris, and S. Onori, "Design and validation of synthetic duty cycles for grid energy storage dispatch using lithium-ion batteries," *Adv. Appl. Energy*, vol. 4, p. 100065, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100065>.
- [4] J. Sun, M. Wu, H. Jiang, X. Fan, and T. Zhao, "Advances in the design and fabrication of high-performance flow battery electrodes for renewable energy storage," *Adv. Appl. Energy*, vol. 2, p. 100016, 2021.
- [5] A. M. Ferrario et al., "A model-based parametric and optimal sizing of a battery/hydrogen storage of a real hybrid microgrid supplying a residential load: Towards island operation," *Adv. Appl. Energy*, vol. 3, p. 100048, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100048>.
- [6] A. Vecchi, Y. Li, Y. Ding, P. Mancarella, and A. Sciacovelli, "Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives," *Adv. Appl. Energy*, vol. 3, p. 100047, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100047>.
- [7] Z. Yin, J. Zheng, H. Kim, Y. Seo, and P. Linga, "Hydrates for cold energy storage and transport: A review," *Adv. Appl. Energy*, vol. 2, p. 100022, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100022>.
- [8] M. Liu, W. Saman, and F. Bruno, "Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2118–2132, 2012, doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>.
- [9] C. Zhao, M. Opolot, M. Liu, F. Bruno, S. Mancin, and K. Hooman, "Phase change behaviour study of PCM tanks partially filled with graphite foam," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 196, p. 117313, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117313>.
- [10] H. A. Al-Salami, N. S. Dhaidan, H. H. Abbas, F. N. Al-Mousawi, and R. Z. Homod, "Review of PCM charging in latent heat thermal energy storage systems with fins," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 51, p. 102640, Jun. 2024, doi: <http://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102640>.
- [11] Y. B. Tao and Y.-L. He, "A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 245–259, 2018, doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.028>.
- [12] C. Zhao et al., "Simulations of melting performance enhancement for a PCM embedded in

Case Stud. Therm. Eng., vol. 28, p. 101407, 2021, doi: <http://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101407>.

[23] B. Kamkari, H. Shokouhmand, and F. Bruno, "Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 72, pp. 186–200, 2014, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.014>.

[24] C. Zhao, J. Wang, Y. Sun, S. He, and K. Hooman, "Fin design optimization to enhance PCM melting rate inside a rectangular enclosure," Appl. Energy, vol. 321, p. 119368, 2022, doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119368>.