



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmsst.qut.ac.ir/>



Effects of Fin Length, Thickness, and Material on Melting Time Improvement of Phase Change Material in Concentric Cylinders

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mahziyar Ghaedi¹
Hamid-Reza Bahrami^{2*}

¹ Master of Science, School of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, ghaedi.m@qut.ac.ir

² Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, taleshbahrami@qut.ac.ir

* Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Khodakaram Boulevard, Qom, Iran. Postal Code: 71551313.

Phone: 025-36169000

Fax: 025-36169359

taleshbahrami@qut.ac.ir ;

Article History

Received: 2024-10-31

Accepted: -2024-12-2

ePublished: -

ABSTRACT

Thermal energy storage is a crucial technology for optimizing energy consumption and reducing heat loss, playing a key role in heating, cooling, and energy storage systems. In this context, the present study focuses on the numerical simulation of the melting process of a phase change material (PCM) in a double-pipe heat exchanger containing RT82. A two-dimensional numerical model was developed using Fluent software for this simulation. In the study, eight rectangular fins with varying lengths and thicknesses but constant total surface area were designed to enhance heat transfer and reduce melting time. This innovative strategy was implemented to increase the energy storage capacity of the PCM. The results showed that a 40% increase in fin length and a change in fin material improved the melting rate of the PCM by 58% and 10%, respectively. These advancements represent a significant step toward enhancing the efficiency of thermal storage systems and reducing energy consumption.

Keywords: Melting; Double tube transfer enhancement; Phase change material; Latent heat; Energy storage.

*نویسنده مسئول: taleshbahrami@qut.ac.ir

۱ مقدمه

انرژی‌های تجدید پذیر، در بیشتر مواقع ناپایدار هستند و ذخیره آن‌ها امری ضروری است. به‌عنوان مثال، انرژی خورشیدی یک منبع انرژی متناوب است که نیاز به تجهیزاتی برای ذخیره‌سازی دارد. به‌منظور حل این مشکل، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به‌صورت گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، برای بهبود کارایی دستگاه‌های انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. در مقایسه با دستگاه‌های ذخیره‌سازی گرمای محسوس معمول، مقدار زیادی انرژی می‌تواند در وزن و حجم بسیار کمتر در ماده تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام) ذخیره شود. در طول شارژ و تخلیه انرژی، ماده تغییر فاز دهنده را می‌توان در دمای کمتری نسبت به سایر مواد برای ذخیره حرارت مناسب مورد استفاده قرار داد. با این‌حال، هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده نقطه ضعف آن است که محققان برای رفع این مشکل از لوله‌های انتقال حرارت، پره، نانوذرات و غیره استفاده کرده‌اند. با توجه به اینکه هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده پایین است، روش‌های متعددی توسط پژوهشگران مختلف در مقالات متفاوت برای رفع این مشکل به کار رفته است [۱، ۲]. از روش‌های پرکاربرد جهت بهبود هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده، افزایش سطح تبادل انتقال حرارت درون ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از فین و پره، افزایش هدایت حرارتی با استفاده از مواد متخلخل است. برای مثال شوبوچن و همکاران [۳]، از دو پره مثلی استفاده کردند، شن و همکاران [۴]، از دو پره مستطیلی استفاده کردند، ژانگ ژنگ و همکاران [۵]، از دو لوله متحدالمرکز با تخلخل در نواحی مختلف بین دو لوله استفاده کردند، ربیع نتاج درزی و همکاران [۶]، از چند لوله در پیکربندی-های مختلف استفاده کردند، ژیانگ و همکاران [۷] از لوله داخلی با گریز از مرکزهای مختلف استفاده کردند، نتایج محققین بیان دارد که قراردادن لوله داغ در پایین مبدل و افزایش دمای سیال

بررسی اثر طول، ضخامت، و جنس پره در بهبود زمان ذوب مواد پی‌سی‌ام پر شده در فضای میان دو استوانه هم‌مرکز

مهیار قائدی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم،
حمیدرضا بهرامی*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

ذخیره‌سازی حرارتی از فناوری‌های مهم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف حرارت است و در سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و ذخیره انرژی نقش کلیدی دارد. در این راستا، پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام) در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای حاوی ماده RT82 پرداخته است. برای این شبیه‌سازی، یک مدل عددی دوبعدی در نرم‌افزار فلوئنت توسعه یافته است. در این مطالعه، هشت پره مستطیلی با طول‌ها و ضخامت‌های متغیر، اما با مساحت کلی ثابت، برای بهبود انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب طراحی شده‌اند. این استراتژی نوآورانه به‌منظور افزایش ظرفیت ذخیره انرژی در پی‌سی‌ام مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش ۴۰ درصدی طول پره‌ها و تغییر جنس آنها به ترتیب باعث افزایش ۵۸ درصد و ۱۰ درصد نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده شده است. این بهبودها گامی موثر در ارتقای کارایی سیستم‌های ذخیره حرارت و کاهش مصرف انرژی است.

کلید واژه‌ها: فرایند ذوب، افزایش انتقال حرارت مبدل دولوله‌ای، ماده تغییر فاز دهنده، گرمای نهان، ذخیره‌سازی انرژی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تغییر فاز دهنده ۳۰ الی ۵۰ درصد بهبود پیدا می‌کند و ماده تغییر فاز دهنده در زمان کمتری ذخیره انرژی به صورت نهان را انجام می‌دهد. چن و همکاران [۱۴]، اثر نوع و هندسه پره بر کاهش مدت زمان انجماد ماده تغییر فاز دهنده درون محفظه مستطیلی را به صورت عددی بررسی کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که شکل و هندسه و طول پره استفاده شده درون محفظه بر مدت زمان انجماد ماده تغییر فاز دهنده اثرگذار است.

از مروری بر منابع مشخص می‌شود که باتری‌های ذخیره انرژی مبتنی بر گرمای نهان یک ابزار بسیار کارآمد برای ذخیره انرژی حرارتی است. یکی از نقایص اصلی این ذخیره‌سازها، استفاده از موادی با قابلیت هدایت حرارتی پایین است. برای رفع این معضل راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از روش‌ها استفاده از سطوح توسعه یافته یا پره به منظور پخش مؤثرتر حرارت در عمق پی‌سی‌ام است. در این مطالعه، فرآیند ذوب درون یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای متحدالمرکز که حاوی ماده تغییر فاز RT82 است، به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. برای انجام این شبیه‌سازی، یک مدل دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار فلوننت ایجاد می‌شود. به منظور تسریع فرایند ذوب، هشت پره مستطیلی با طول‌ها و ضخامت‌های متغیر، اما با مساحت ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثر پارامترهای مختلف نظیر طول، ضخامت و جنس پره بر فرایند ذوب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲ بیان مسئله و فرمولاسیون

در این مطالعه یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای حاوی ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفته است. با صرف نظر از اثرات ابتدا و انتهای مبدل به دلیل یکسان بودن نرخ انتقال حرارت درون حجم مبدل، می‌توان آن را به صورت دوبعدی مدل‌سازی کرد. شماتیک هندسه در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این هندسه، شعاع لوله داخلی ۴/۵ میلی‌متر است. قطر لوله بیرونی متناسب با شرایط مسئله (به دلیل تغییر سطح ماده تغییر فاز دهنده متناسب با

داغ، باعث کاهش زمان ذوب به میزان ۵۷ درصد شده است. اسماعیل و همکاران [۸]، اثر تعداد فین بر نرخ انجماد ماده تغییر فاز دهنده را ارزیابی کردند، افزایش تعداد فین باعث کاهش ۴۰ درصدی مدت زمان انجماد ماده تغییر فاز دهنده شده است. لیو و همکاران [۹]، از دو لوله متحدالمرکز با ۸ پره متخلخل استفاده کردند. رحیمی و همکاران [۱۰]، هندسه دارای شعاع لوله داخلی ۲۵/۴ میلی‌متر با ضخامت ۱۰۲ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل شعاع لوله وسط (r_m) و لوله بیرون (r_o) به ترتیب ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر با ضخامت دو میلی‌متر است. محققین در مطالعه خود جهت بهبود نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده از ماده مس که دارای رسانایی حرارتی بالایی است در تشکیل لوله‌ها استفاده کرده‌اند. مت و همکاران [۱۱]، به صورت مش‌بندی (ارائه شده در نرم‌افزار فلوننت) هندسه بدون پره، چهار پره با نصف ابعاد و سه واحد پره را بررسی کردند. با گذشت زمان به دلیل وجود پره و افزایش سطح تبادل انتقال حرارت، ماده تغییر فاز دهنده بیشتری در واحد ۴ پره با نصف ابعاد نسبت به هندسه بدون پره ذوب می‌شود. ال عبیدی و همکاران [۱۲]، نتایج کسر مایع را برای هندسه لوله سه‌تایی با استفاده از یک لایه پی‌سی‌ام بررسی کردند. نتایج استخراج شده بیان دارد که، زمان انجماد با افزایش شعاع لوله میانی افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که با افزایش شعاع، فضای ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد که اثرات همرفت طبیعی را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، کسر مایع RT35 در $t = 6000s$ برای شعاع لوله میانی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر به ترتیب ۳۴/۵۲، ۳۱/۶۲، ۲۹/۲۵ درصد است. بنابراین افزودن لوله میانی انجماد را بهبود می‌بخشد.

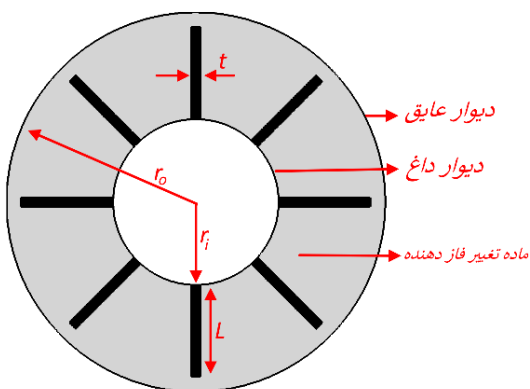
مؤلفه‌های بسیاری در توزیع و رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده همچون هندسه محفظه پر شده از ماده تغییر فاز دهنده، نحوه توزیع و چیدمان فین اثرگذار هستند. کامکاری و وهابی [۱۳]، اثر نحوه قرارگیری حفره مستطیلی پر شده از ماده تغییر فاز دهنده نسبت به افق را بررسی کردند و یافته‌ها حاکی از آن است که با کاهش زاویه مخزن از ۹۰، ۴۵ و ۰ درجه، مدت زمان ذوب ماده

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 v) + (\rho\beta)g(T - T_{ref}) + v \cdot \left(-C \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{DC_p T}{Dt} \right) = k(\nabla^2 T) - \rho \left(\frac{D\Delta H}{Dt} \right) \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{wall} - T_{melting})D^3 \rho_{pcm}^2}{\mu_{pcm}^2} \quad (5)$$

در معادلات فوق، u و v مؤلفه‌های سرعت، μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار، K ضریب هدایت حرارتی، ΔH گرمای نهان و C ثابت منطقه خمیری است. این پارامتر، وقتی سرعت به صفر نزدیک می‌شود، میرایی را کنترل می‌کند. این پارامتر معمولاً در اکثر مطالعات عددی حدود $10^5 - 10^6$ تنظیم می‌شود. همچنین ε یک عدد کوچک (0.01) برای جلوگیری از تقسیم بر صفر است. T_{ref} دمای مرجع ماده تغییر فاز دهنده است که متناسب با دمای اولیه در نظر گرفته شده است. λ بیانگر نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده است، مقداری بین صفر و یک دارد و رفتار ذوب ماده را شرح می‌دهد و وابسته به جامد و مایع بودن ماده است. در صورت جامد بودن ماده مقدار $\lambda = 0$ ، در فرایند تغییر فاز $0 \leq \lambda \leq 1$ و هنگامی که کاملاً مایع است، $\lambda = 1$ می‌باشد [۱۹].



شکل ۱: پیکربندی هندسه با ۸ پره

میزان سطوح پره) ۲۰ الی ۲۱ میلی‌متر است. در این مطالعه از سه فلز مختلف با جنس‌های مس، آلومینیوم و فولاد به‌عنوان جنس پره‌ها استفاده شده است، تا تأثیر جنس پره نیز بر میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده نشان داده شود. هشت پره با طول متغیر سه الی پنج میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ الی دو میلی‌متر بر روی لوله داخلی قرار می‌گیرند. فرض می‌شود که حجم ماده تغییر فاز دهنده درون مبدل ثابت است. این حجم در حالت بدون پره ۲۵۰ میلی‌متر مربع در هر متر است. لوله داغ دارای دمای ثابت ۳۷۰ و دمای اولیه پی‌سی‌ام ۳۰۳ کلوین قرار داده شده است. همچنین از ماده تغییر فاز دهنده با نام تجاری آن RT82 مورد استفاده قرار گرفته است. RT82 به دلیل دما ذوبی که دارد در کاربردهایی همچون بخاری‌های خانگی قابل استفاده است. خواص فیزیکی و ترمودینامیکی پی‌سی‌ام (RT82) و جنس پره‌های استفاده شده در مطالعه حاضر در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با فرض اینکه مذاب ماده تغییر فاز دهنده دارای رفتار نیوتنی با ویسکوزیته ثابت و تراکم‌ناپذیر می‌باشد،

می‌توان معادلات شرح دهنده رفتار ماده تغییر فاز دهنده را به صورت زیر توصیف کرد. معادلات زیر به ترتیب عبارتند از، پیوستگی (۱)، معادلات مومنوم سیال در راستای X و Y (۲-۱)، معادله انرژی (۴) و عدد گرافش که بیانگر رفتار حرارتی ماده تغییر فاز دهنده است. نرخ تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده نیز با استفاده از دو منبع نیرویی افزوده شده به درون معادلات مومنوم و همچنین تقریب بوزینسک تشریح شده است [۱۷، ۱۸]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 u) + Cu \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \quad (2)$$

برای سه شبکه درشت (۲۰۰۰۰ المان)، شبکه متوسط (۳۰۰۰۰ المان) و شبکه ریز (۴۰۰۰۰ المان) نشان داده است. جدول ۳، میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های متفاوت را نشان داده است، مطابق جدول با افزایش المان شبکه، نتایج مطابقت بالایی دارند، میزان خطای بین شبکه‌ها کمتر از ۱ درصد است و برای کاهش زمان محاسبات، شبکه متوسط با ۳۰۰۰۰ المان برای ادامه حل مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳: میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های متفاوت برای شبکه‌های مختلف

| شبکه درشت (۲۰۰۰۰ المان) | |
|------------------------------|-------------|
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۱۳ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۶۱ |
| نسبت خطا با ریزترین شبکه (%) | ۰/۹۷ - ۱/۳۸ |
| شبکه متوسط (۳۰۰۰۰ المان) | |
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۰۷ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۵۱ |
| نسبت خطا با ریزترین شبکه (%) | ۰/۴۸ - ۰/۱۵ |
| شبکه ریز (۴۰۰۰۰ المان) | |
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۰۹ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۵۲ |
| نسبت خطا با ریزترین شبکه (%) | - |

۴ استقلال حل از گام زمانی

استقلال گام زمانی برای اطمینان از منحصربه‌فرد بودن نتایج فرآیند ذوب در این مقاله در نظر گرفته شده است. کسر حجمی یک پارامتر اندازه‌گیری شده است که در شکل ۳ در چهار زمان مختلف نشان داده شده است. استقلال گام زمانی برای گام‌های زمانی مختلف شامل ۱، ۱/۵ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. این مقادیر در شکل ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که گام‌های زمانی ۱ و ۱/۵ نتایج تقریباً نزدیکی را ارائه دادند؛ مطابق با نتایج بدست آمده در بخش حاضر، جهت استخراج نتایج نهایی مطالعه، گام زمانی ۱ ثانیه انتخاب شده است.

جدول ۱: خواص ماده تغییر فاز دهنده [۱۵]

| مقدار | خواص پی‌سی‌ام |
|-----------------------|----------------------------------|
| $\frac{kg}{m^3} ۷۷۰$ | چگالی پی‌سی‌ام مایع (ρ_l) |
| $\frac{kg}{m^3} ۹۵۰$ | چگالی پی‌سی‌ام جامد (ρ_s) |
| $\frac{J}{kg.K} ۲۰۰۰$ | گرمای ویژه (c_p) |
| $\frac{W}{m.K} ۲$ | ضریب هدایت حرارتی (k) |
| $K ۳۵۸/۱۵ - ۳۵۰/۱۵$ | محدوده دمای ذوب (T_m) |
| $\frac{J}{kg} ۱۷۶۰۰۰$ | گرمای نهان ذوب (L) |
| $Pa.s ۰.۳۴۹۹$ | ویسکوزیته دینامیکی (μ) |
| $\frac{1}{K} ۰.۰۰۱$ | ضریب انبساط حرارتی (β) |
| RT82 | نام پی‌سی‌ام |

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی فلزات [۱۶]

| آلومینیوم | |
|-----------------------|---------------------------|
| $\frac{kg}{m^3} ۲۷۱۹$ | چگالی (ρ) |
| $\frac{W}{m.K} ۲۰۲$ | ضریب هدایت حرارتی (k) |
| $\frac{J}{kg.K} ۸۷۱$ | گرمای ویژه (c_p) |
| مس | |
| $\frac{kg}{m^3} ۸۹۷۸$ | چگالی (ρ) |
| $\frac{W}{m.K} ۳۸۷$ | ضریب هدایت حرارتی (k) |
| $\frac{J}{kg.K} ۳۸۱$ | گرمای ویژه (c_p) |
| استیل | |
| $\frac{kg}{m^3} ۸۰۳۰$ | چگالی (ρ) |
| $\frac{W}{m.K} ۱۶$ | ضریب هدایت حرارتی (k) |
| $\frac{J}{kg.K} ۵۰۲$ | گرمای ویژه (c_p) |

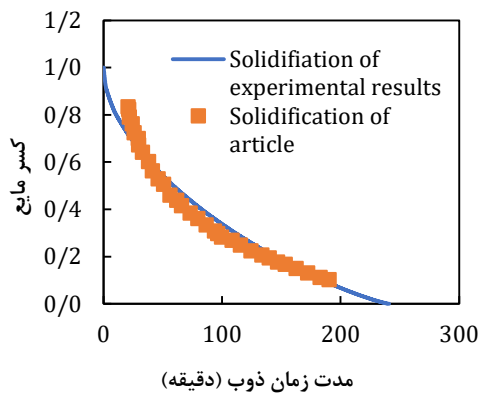
نوع انتقال حرارت درون ماده تغییر فاز دهنده از نوع رسانش و جابجایی آزاد است و برای بررسی رفتار جریان ذوب شده، از عدد گراشف استفاده شده است. مطابق با خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی حاکم بر مبدا و ماده تغییر فاز دهنده، عدد گراشف در مطالعه حاضر مقدار ۱۲۵ است و بیان دارد که نیروهای شناوری بسیار بیشتر از نیروی‌های ویسکوز هستند همچنین نوع رفتار جابجایی آزاد در مطالعه حاضر از نوع آرام است [۲۰].

۳ استقلال حل از شبکه

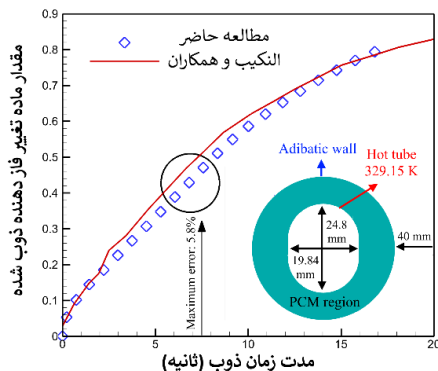
استقلال شبکه برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه تولید شده در نظر گرفته شده است. شکل ۲، استقلال حل از شبکه را

۵ اعتبارسنجی

برای اعتبار سنجی از نتایج مرجع [۲۱] استفاده شده و نتایج مقایسه این مطالعه با مرجع مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی بدست آمده توسط محققین در گذشته، با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر همخوانی مناسبی دارد. همچنین در اعتبارسنجی دیگر، اثر میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده درون مبدل دولوله که به صورت عددی انجام شده است، ارزیابی شده است. نتایج اعتبارسنجی دوم و مطابقت میزان فرایند ذوب مطالعه حاضر با مطالعه محققین [۲۲] در شکل ۵، نشان داده شده است.



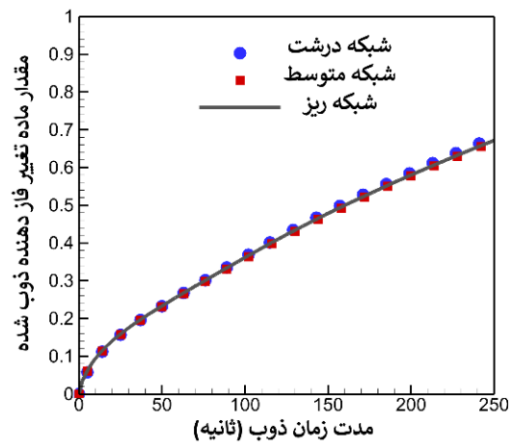
شکل ۴: اعتبارسنجی پیکربندی هندسه بدون پره در فرآیند انجماد با نتایج مرجع [21]



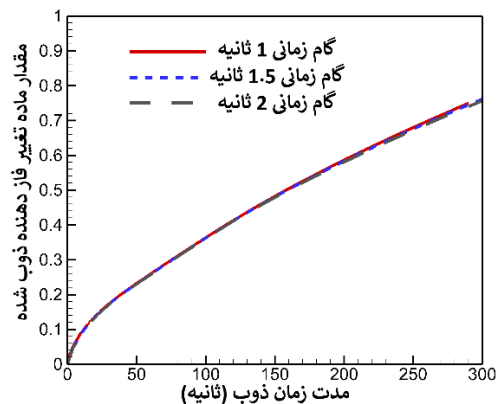
شکل ۵: اعتبارسنجی پیکربندی هندسه بدون پره در فرآیند ذوب [22]

جدول ۴: میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های متفاوت برای گام‌های زمانی مختلف

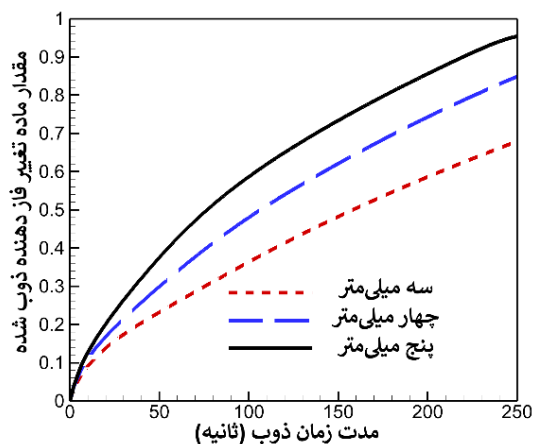
| گام زمانی ۱ ثانیه | |
|--------------------------------|-------------|
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۰۷ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۵۱ |
| نسبت خطا با کمترین گام زمانی % | - |
| گام زمانی ۱/۵ ثانیه | |
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۰۹ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۵۵ |
| نسبت خطا با کمترین گام زمانی % | ۰/۶۱ - ۰/۴۹ |
| گام زمانی ۲ ثانیه | |
| مقدار ذوب در زمان ۱۲۰ ثانیه | ۰/۴۱۰ |
| مقدار ذوب در زمان ۲۴۰ ثانیه | ۰/۶۵۴ |
| نسبت خطا با کمترین گام زمانی % | ۰/۴۶ - ۰/۷۲ |



شکل ۶: استقلال مش پیکربندی هندسه با چهار پره



شکل ۷: استقلال گام زمانی



شکل ۶. میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در طول‌های متفاوت پره

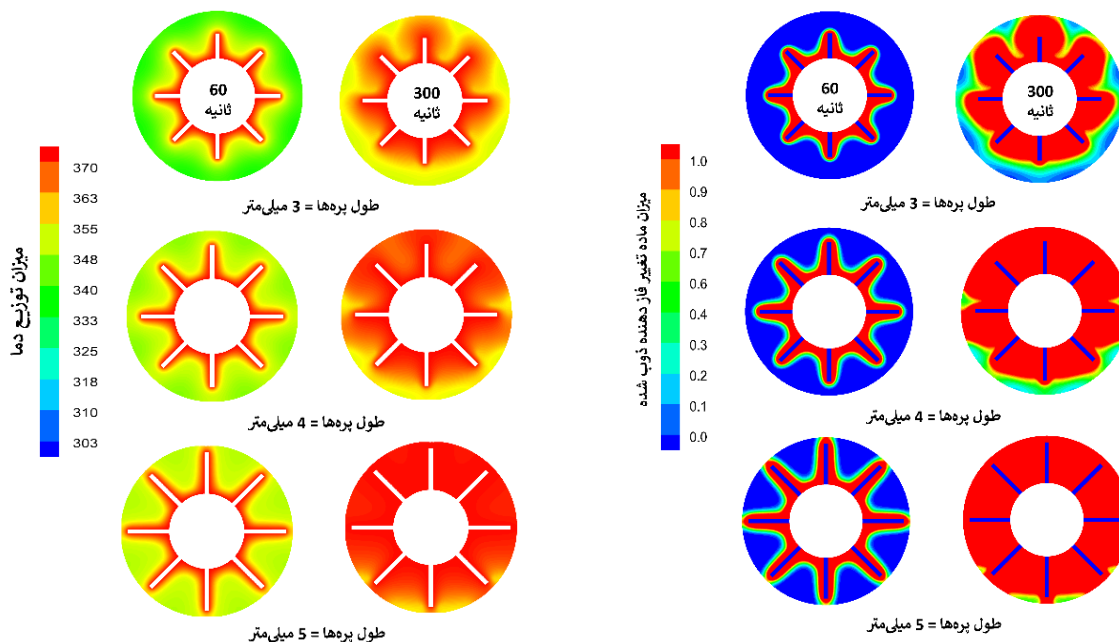
شکل ۸، کانتور توزیع دما درون ماده تغییر فاز دهنده متناسب با افزایش طول پره‌ها را نشان داده است. افزایش طول پره‌ها باعث می‌شود که سطح تبادل حرارت بیشتری درون حجم ماده تغییر فاز دهنده قرارگیرد. مطابق با شکل ۸، در زمان ۳۰۰ ثانیه از فرایند ذوب، مبدل با طول پره ۵ میلی‌متر، توزیع دمای بسیار بیشتری درون حجم ماده تغییر فاز دهنده داشته است. افزایش طول پره‌ها به دلیل جنس و بالا بودن هدایت حرارتی آن‌ها باعث افزایش نرخ انتقال حرارت از نوع رسانش درون حجم ماده تغییر فاز دهنده شده است. حرارت تولید شده توسط سیال داغ به روش رسانش با سرعت بیشتری به درون ماده تغییر فاز دهنده منتقل شود و دما در تمام سطح ماده تغییر فاز دهنده افزایش پیدا می‌کند و باعث می‌شود نواحی بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده به دمای تغییر فاز دستیابی پیدا کنند و ذوب سریع‌تر و یکنواخت‌تری را نتیجه دهد. با آغاز ذوب ماده تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت جابجایی آزاد نیز تقویت شده و نرخ ذوب افزایش پیدا کرده است.

۶ نتایج و بحث

در این بخش اثر طول و ضخامت‌های مختلف پره و نیز اثر جنس پره‌ها جهت تسریع فرآیند ذوب RT82 به‌عنوان پی‌سی‌ام بررسی و معرفی شده است.

۱-۶ اثر طول پره

در این بخش از هشت پره با سه طول متفاوت به ابعاد ۳، ۴ و ۵ به‌منظور بررسی اثر طول پره استفاده شده است. زمان ذوب برای مقایسه خطوط کسر ذوب در موارد مختلف و به دست آوردن وضعیت بهینه، طول‌های پره به‌گونه‌ای انتخاب شدند که ذوب پی‌سی‌ام در سراسر سطح مقطع رخ دهد. نتایج در شکل ۶ به‌صورت نمودار نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، طول پره با ابعاد ۵ میلی‌متر کمترین زمان ذوب را نسبت به بقیه موارد را دارد. اصلی‌ترین دلیل کاهش مدت زمان ذوب و افزایش نرخ ذوب در هنگام افزایش طول پره، افزایش سطح تماس درون حجم ماده تغییر فاز دهنده است. با افزایش طول پره، پره نواحی بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده را در بر می‌گیرد و موجب افزایش هدایت حرارتی و نرخ انتقال حرارت شده است و در نتیجه ذوب ماده تغییر فاز دهنده بهبود پیدا کرده است. با مقایسه حالت پره با طول ۳ میلی‌متر و حالت پره با طول ۵ میلی‌متر، نتیجه شده است که نرخ ذوب و کسر مایع شده ماده تغییر فاز دهنده در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه از فرایند ذوب به میزان ۵۸ درصد بهبود پیدا کرده است. شکل ۷، کانتور کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده را در زمان‌های ۶۰ و ۳۰۰ ثانیه نمایش داده است. با افزایش طول پره، سطح بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده در مجاورت پره‌های داغ قرار گرفته است و نرخ ذوب بهبود پیدا کرده است.



شکل ۸: کانتور توزیع دما در زمان‌های ۶۰ و ۳۰۰ ثانیه برای طول‌های مختلف

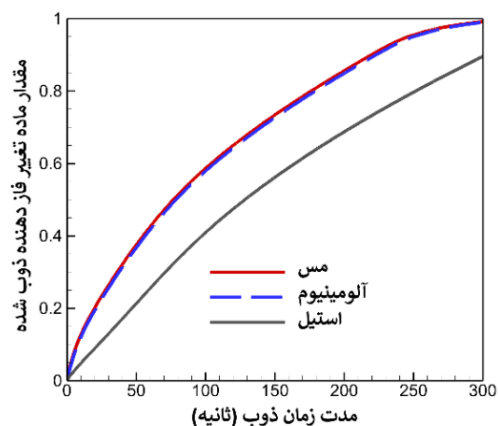
شکل ۷: کانتور میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های ۶۰ و ۳۰۰ ثانیه

۳-۶ اثر جنس پره

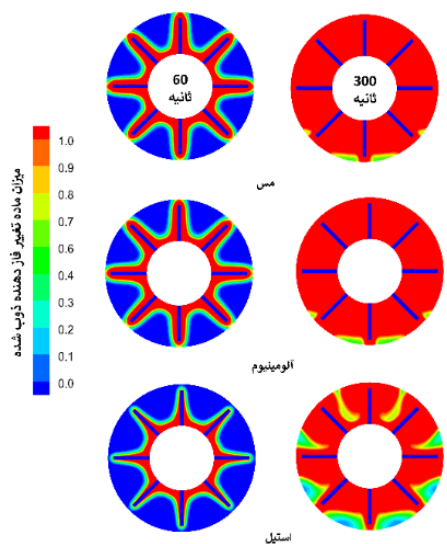
جنس پره نیز اثر مستقیمی بر میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده دارد. در بخش حاضر اثر جنس‌های مختلف پره ارزیابی شده است. استفاده از پره با جنس آلومینیوم و مس به دلیل هدایت حرارتی بالایی که دارند، باعث تقویت انتقال حرارت از نوع رسانش درون ماده تغییر فاز دهنده شده و گزینه مناسب و بهینه‌ای جهت کاهش زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده هستند. استیل به دلیل رسانایی حرارتی پایینی که نسبت به دو ماده آلومینیوم و مس دارد، نرخ انتقال حرارت رسانش کمتری دارد و مدت زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. شکل ۱۱ و ۱۲، به ترتیب نمودار و کانتور ذوب ماده تغییر فاز دهنده برای جنس‌های مختلف پره را نمایش داده‌اند. مس و آلومینیوم نرخ تغییر فاز نزدیک به یکدیگر را دارا هستند. گرمای ویژه آلومینیوم از مس بالاتر است و هدایت حرارتی مس از آلومینیوم بالاتر و این

۲-۶ اثر ضخامت پره

در بخش حاضر، اثر ضخامت پره‌ها بر روی فرایند ذوب بررسی شده است. در بخش قبل نتیجه شد که افزایش طول پره موجب بهبود نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده شده است. در این بخش اثر افزایش ضخامت پره بر روی یک هندسه شامل پره‌هایی با طول ۴ میلی‌متر بررسی شده است. سه مدل پره با ضخامت ۵/۰، ۱ و ۲ میلی‌متر مدل‌سازی شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ که به ترتیب نمودار و کانتور ذوب ماده تغییر فاز دهنده را نمایش داده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بازه بررسی شده افزایش ضخامت پره، مدت زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده را بهبود نمی‌دهد. مشاهده می‌شود که در زمان‌های میانی از ذوب ماده تغییر فاز دهنده، نرخ ذوب در پره‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر بهتر است اما در انتهای فرایند و در مراحل پایانی ذوب شدن کامل ماده تغییر فاز دهنده، پره با ضخامت ۵/۰ میلی‌متر بهتر عمل کرده است.



شکل ۱۱: میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده برای جنس‌های متفاوت پرها

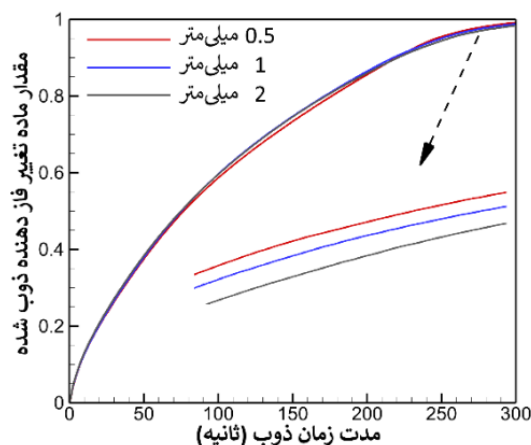


شکل ۱۲: کانتور میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های ۶۰ و ۳۰۰ ثانیه

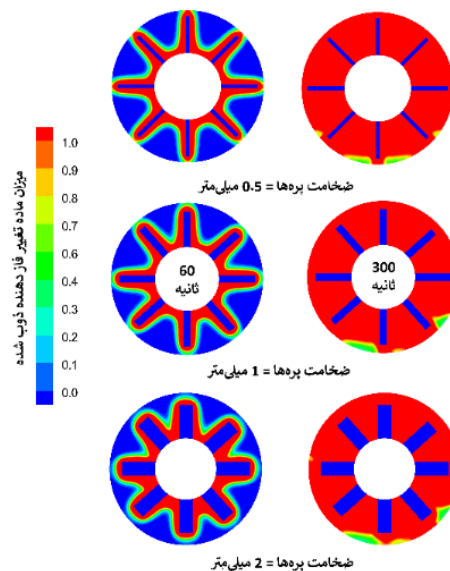
۷ نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، بررسی مشخصه‌های پره‌های استفاده شده درون میدل پوسته لوله جهت ذخیره انرژی حرارتی است. عواملی همچون، طول پره، ضخامت پره و جنس پره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر عبارت‌اند از:

دو ویژگی باعث نزدیک بودن نرخ تغییر فاز شده است. متناسب با شرایط بدست آمده در بخش حاضر به دلیل سبک وزن بودن آلومینیوم نسبت به مس، پره با جنس آلومینیوم گزینه مناسب‌تری جهت افزایش نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. مطابق با نتایج بدست آمده در بخش حاضر، پرها با جنس مس و آلومینیوم میزان نرخ ذوب را به میزان ۱۰ درصد نسبت به استیل بهبود می‌دهند.



شکل ۹: میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در ضخامت‌های متفاوت پره



شکل ۱۰: کانتور میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های ۶۰ و ۳۰۰ ثانیه

| | |
|------|-------------------|
| w | wall |
| s | solid of the PCM |
| l | liquid of the PCM |
| i, o | inner, outer tube |

- ۱- افزایش طول پره‌ها از ۳ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر موجب تسریع ذوب به میزان ۵۸ درصد شده است.
- ۲- افزایش ضخامت پره، تأثیر قابل‌توجهی زیادی در بهبود ذوب ماده تغییر فاز دهنده ندارد.
- ۳- جنس پره بسیار در میزان نرخ ذوب اثرگذار است. استفاده از فلزات با رسانایی حرارتی بسیار بالا باعث تسریع ذوب می‌شود.

منابع

- [1] A. El Hanafi, N. Blet, A. Kheiri, and B. Remy, "Study of the thermal dynamic behavior of a rectangular enclosure with fins embedded in PCM," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2766, no. 1, p. 012005, May 2024.
- [2] Y. Zhang et al., "Accelerating the solar-thermal energy storage via inner-light supplying with optical waveguide," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, p. 3456, 2023.
- [3] S.-B. Chen et al., "Combined effect of using porous media and nano-particle on melting performance of PCM filled enclosure with triangular double fins," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, p. 100939, Jun. 2021.
- [4] L.-L. Tian, X. Liu, S. Chen, and Z.-G. Shen, "Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure," *Applied Thermal Engineering*, vol. 167, p. 114764, 2020.
- [5] Y. Xu, Q. Ren, Z.-J. Zheng, and Y.-L. He, "Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media," *Applied Energy*, vol. 193, pp. 84–95, May 2017.
- [6] A. Pourakabar and A. A. Rabienataj Darzi, "Enhancement of phase change rate of PCM in cylindrical thermal energy storage," *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, pp. 132–142, Mar. 2019.
- [7] X. Cao, Y. Yuan, B. Xiang, and F. Haghghat, "Effect of natural convection on melting performance of eccentric horizontal shell and tube latent heat storage unit," *Sustainable Cities and Society*, vol. 38, pp. 571–581, 2018.
- [8] K. A. R. Ismail, C. L. F. Alves, and M. S. Modesto, "Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder," *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 53–77, 2001.
- [9] Z. Liu, Y. Yao, and H. Wu, "Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal

فهرست علائم

| | |
|-------|---|
| C | mushy zone constant |
| c_p | specific heat of PCM ($\frac{J}{kg.K}$) |
| g | gravity acceleration ($\frac{m}{s^2}$) |
| Gr | Grashof number ($Gr = \frac{g\beta(T_{wall}-T_{melting})D^3\rho_{pcm}^2}{\mu_{pcm}^2}$) |
| h | sensible enthalpy ($\frac{J}{kg}$) |
| H | enthalpy ($\frac{J}{kg}$) |
| k | thermal conductivity ($\frac{W}{m.K}$) |
| L | latent melting heat ($\frac{J}{kg}$) |
| P | pressure (Pa) |
| t | time (s) |
| T | temperature (K) |
| u, v | velocity component in r-, h-direction ($\frac{m}{s}$) |
| r | cylinder radius m |

حروف یونانی

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| ρ | fluid density ($\frac{kg}{m^3}$) |
| λ | Liquid fraction |
| β | thermal expansion ($\frac{1}{K}$) |
| μ | dynamic viscosity (Pa.s) |
| ε | constant |

زیرنویس

| | |
|-----|------------------------|
| int | initial |
| ref | reference |
| HTF | heat transfer fluid |
| TES | thermal energy storage |

- melting in square cells: A numerical study," *Journal of Energy Storage*, vol. 105, p. 114680, 2025.
- [19] [19] S. Al Arni et al., "Novel multi-layer nano-modified PCM configuration for efficient thermal management of photovoltaic-thermal systems," *Journal of Energy Storage*, vol. 103, p. 114352, Dec. 2024.
- [20] [20] M. Bechiri and K. Mansouri, "Study of heat and fluid flow during melting of PCM inside vertical cylindrical tube," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 135, pp. 235–246, Jan. 2019.
- [21] [21] J. M. Mahdi and E. C. Nsofor, "Solidification of a PCM with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 596–604, Sep. 2016.
- [22] [22] M. A. Alnakeeb, M. A. Abdel Salam, and M. A. Hassab, "Eccentricity optimization of an inner flat-tube double-pipe latent-heat thermal energy storage unit," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, p. 100969, 2021.
- energy storage," *Applied Energy*, vol. 112, pp. 1222–1232, Dec. 2013.
- [10] M. M. Hossieni and A. B. Rahimi, "Improving heat transfer in a triplex tube heat exchanger containing phase-change materials by modifications of length and position of fins," *Scientia Iranica*, vol. 27, no. 1, pp. 239–251, Feb. 2020.
- [11] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins," *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 223–236, Oct. 2013.
- [12] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 61, pp. 684–695, Jun. 2013.
- [13] babak kamkari and M. and Vahabi, "Experimental investigation and numerical simulation of thermal energy storage in phase change material under different tilt angles of the enclosure," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 11, 2018.
- [14] Y. Chen et al., "Compound usage of L shaped fin and Nano-particles for the acceleration of the solidification process inside a vertical enclosure (A comparison with ordinary double rectangular fin)," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101415, Dec. 2021.
- [15] J. Khan, K. Nithyanandam, and P. Singh, "Computational study on transient thermal performance enhancement of phase change materials in triplex tube heat exchanger through novel annular-finned configurations," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, pp. 1–18, Jul. 2024.
- [16] C. Nie, S. Deng, and J. Liu, "Effects of fins arrangement and parameters on the consecutive melting and solidification of PCM in a latent heat storage unit," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101319, Jun. 2020.
- [17] M. Benaissa et al., "Maximizing thermal response in latent heat thermal energy storage systems: A comprehensive study of wavy fin configuration and distribution," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 159, p. 108172, Dec. 2024.
- [18] F. L. Rashid, A. F. Khalaf, H. Togun, A. Chattopadhyay, M. A. Al-Obaidi, and B. K. Sharma, "Investigating the impact of fin configuration on phase change material