

# بررسی عددی استفاده از پره‌های توپر یا متخلخل برای بهبود انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای حاوی پی‌سی‌ام، مناسب برای مدیریت حرارتی ماهواره‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۴

حمیدرضا بهرامی<sup>۱</sup>، مهدی صابری<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، taleshbahrami@qut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی قم

## چکیده

استفاده از پی‌سی‌ام‌ها گزینه مناسبی در مدیریت حرارتی ماهواره‌ها به منظور جلوگیری از افزایش دما و بهبود عمر قطعات الکترونیکی تولید کننده حرارت است. این مواد ضمن تغییر فاز، گرمای نهان را ذخیره و در زمان مناسب انتقال می‌دهند. در این مقاله، به بررسی عددی استفاده از پره‌های متخلخل برای بهبود انتقال حرارت در پی‌سی‌ام‌ها پرداخته شده است. یک پارامتر به نام اثربخشی برای مقایسه طراحی‌های مختلف تعریف شده است. سامانه‌ای که مقدار بزرگ‌تری از این پارامتر را داشته باشد، پی‌سی‌ام بیشتری را در زمان کمتری ذوب می‌کند. هندسه مورد مطالعه یک استوانه تو در تو است که فضای بین آن‌ها با ماده پی‌سی‌ام پر شده و دیواره داخلی و خارجی در دمای ثابت هستند. اثر پارامترهای مختلفی نظیر طول و ضخامت پره‌های متخلخل، شرایط مرزی دمایی، جنس پره‌های متخلخل (اثر نفوذپذیری) و نوع پره بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که پره‌های متخلخل به خوبی می‌توانند مشکل پخش حرارت درون پی‌سی‌ام را حل کنند. به عنوان مثال هندسه با پنج پره متخلخل (با طول و ضخامت به ترتیب ۴۵ و ۱۵ میلی‌متر) تقریباً زمان ذوب را به یک سوم کاهش داده و دارای اثربخشی ۲۰۹ است.

**واژه‌های کلیدی:** پی‌سی‌ام، مدیریت حرارتی، مواد متخلخل، مواد تغییر فاز دهنده، مبدل حرارتی، فوم فلزی، انتقال حرارت

۳۳

سال ۱۳ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



دانشگاه صنعتی قم

مبدل حرارتی دولوله‌ای حاوی پی‌سی‌ام مناسب برای مدیریت حرارتی ماهواره  
بررسی عددی استفاده از پره‌های توپر یا متخلخل برای بهبود انتقال حرارت در یک

## Numerical investigation of the use of solid or porous fins to improve heat transfer in an annular heat exchanger: Suitable thermal management of satellites

Hamid-Reza Bahrami<sup>1</sup>, Mehdi Saberi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

2- MSc, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

### Abstract

Using PCMs is a suitable option in the thermal management of satellites to prevent temperature increase and improve the life of electronic components that generate heat. While changing phase, these materials store latent heat and transfer it at the right time. This article has numerically investigated the use of porous fins to improve heat transfer in PCMs. A parameter called effectiveness has been defined to compare different designs. A system with a larger value of this parameter melts more PCM in less time. The studied geometry is an annular cylinder. The space between the walls is filled with a PCM, and the inner and outer walls are at a constant temperature. The effect of different parameters, such as the length and thickness of the porous vanes, temperature boundary conditions, the type of porous vanes (permeability effect), and the type of fins, were investigated. The results show that porous blades can improve the problem of heat dissipation inside PCMs. For example, in the geometry with five porous fins (with length and thickness of 45 mm and 15 mm, respectively), the melting time is reduced to almost on-third, and it has an efficiency of 2.9.

**Keywords:** PCM, thermal management, porous materials, phase change materials, metallic foam, heat transfer.

## ۱. مقدمه

زیرسامانه‌ها و تجهیزات مربوط به ماهواره‌ها به دلیل محدودیت‌های وزنی مدام در حال کوچک‌تر شدن هستند و چگالی توان آن‌ها نیز روز به روز افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که در عین کوچکی، توان الکتریکی بسیار بالایی برای راه‌اندازی و کارکرد آن‌ها نیاز است. بخش زیادی از این توان تبدیل به گرما شده که منجر به بالا رفتن دمای پردازنده‌ها می‌شود. دمای بالای ممتد می‌تواند منجر به کوتاه شدن عمر قطعات شود. این موضوع در ماهواره‌های کوچک‌تر پررنگ‌تر است. بنابراین، مدیریت حرارتی ماهواره‌های کوچک برای کارآمدی سامانه‌های اویونیک و تضمین بقای آن‌ها در شرایط سخت حرارتی ضروری است. سامانه‌های مدیریت حرارتی ماهواره‌ای به‌عنوان روش‌های غیرفعال<sup>۱</sup> و فعال<sup>۲</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. سامانه‌های غیرفعال، فرایند مدیریت حرارتی را بدون نیاز به توان الکتریکی فراهم می‌کند. از این دست مدیریت حرارتی می‌توان به استفاده از تشعشع کننده‌های حرارتی<sup>۳</sup>، عایق‌های چندلایه<sup>۴</sup>، پوشش‌ها، و مواد تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام)<sup>۵</sup> اشاره کرد. در مقابل، سامانه‌های فعال نیازمند تغذیه هستند و از آن دسته می‌توان به خنک‌کننده‌های ترموالکتریک<sup>۶</sup>، هیترها، لوورها<sup>۷</sup>، مدارهای حاوی سیال پمپ شده و غیره اشاره کرد [۱،۲].

در مورد کنترل دمای فضاپیماهای کوچک، مواد ذخیره‌ساز انرژی حرارتی یک انتخاب بسیار عالی هستند. به‌عنوان مثال، مواد ذخیره‌ساز انرژی ترموشیمیایی<sup>۸</sup> انرژی را از طریق فرآیندهای شیمیایی ذخیره می‌کنند و ذخیره‌سازهای گرمای محسوس<sup>۹</sup>، گرما را با تغییر دما حفظ می‌کنند. درحالی‌که، مواد ذخیره‌سازی انرژی نهان<sup>۱۰</sup> انرژی را از طریق تغییرات در فاز فیزیکی خود ذخیره می‌کنند. پی‌سی‌ام‌ها به‌عنوان مواد ذخیره‌ساز

گرمای نهان شناخته می‌شوند. اغلب در فرایندهای مدیریت حرارتی از پی‌سی‌ام جامد-مایع استفاده می‌شود. این مواد هنگامی که گرم می‌شوند از جامد به مایع تبدیل شده و انرژی حرارتی را ذخیره و در زمان خنک‌کاری پی‌سی‌ام حالت جامد خود را بازیابی می‌کند [۳،۴]. عیب اصلی پی‌سی‌ام‌ها قابلیت حرارتی پایین آن‌ها نسبت به سایر مواد هادی حرارتی است که انتقال حرارت از طریق آن را محدود و در نتیجه عملکرد حرارتی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود انتقال حرارت در پی‌سی‌ام‌ها با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است. بسیاری از محققان کامپوزیت‌های پی‌سی‌ام با فین‌های فلزی را برای بهبود انتقال حرارت در پی‌سی‌ام را بررسی کردند [۵-۹]. به‌عنوان مثال، هو و همکاران [۱۰] تأثیر فین‌های فلزی درختی‌شکل بر بهبود انتقال حرارت در پی‌سی‌ام‌ها را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. پی‌سی‌ام مورد استفاده در این تحقیق از جنس پارافین (RT 35 HC, RT 35, RT 44 HC) است. این مطالعه نشان داد که فین‌های درختی‌شکل، زمان فرایند ذوب را تا ۱۳ درصد در مقایسه با فین‌های معمولی بهبود می‌بخشند. پاسارو و همکاران [۱۱] سامانه‌های مدیریت حرارتی بر مبنای گرمای نهان با استفاده از موم پارافین A53 با فین‌های فلزی و نانو ذرات گرافن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند وقتی از تعداد زیادی پره استفاده می‌شود، اثر نانوذرات بر بهبود انتقال حرارت در اولویت دوم قرار می‌گیرد. پاکرو و همکاران [۱۲] در یک مطالعه عددی ترکیب پارافین (از جنس RT44HC) با فین‌های فلزی را برای کاربردهای کنترل حرارتی را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها بیان می‌کند که به جز دمای بحرانی ۵۰ درجه سانتی‌گراد، که درصد بهینه ۶۰.۶۱٪ در سینک‌های فین دار است، درصد‌های بهینه پی‌سی‌ام برای همه دماهای



حساس ۰.۸۲۶۵٪ است. علاوه بر این، تحقیقات دیگری برای بررسی ترکیب فوم فلزی با پی سی ام های آلی یا بر پایه نمک انجام شده است [۱۳-۱۷]. گوپالان و همکاران [۱۸] از حل عددی برای بررسی امکان استفاده هم زمان محیط متخلخل با سازمان همراه با پی سی ام ان آیکوزان<sup>۱۱</sup> برای مدیریت حرارتی بورد های الکترونیکی را بررسی کردند. آن ها نشان دادند که استفاده از ساختار متخلخل قاب شکل مشبک اشباع از پی سی ام به طور قابل توجهی عملکرد هیت سینک را برای شرایط مختلف بهبود می بخشد. علاوه بر این، وانگ و همکاران [۱۹] یک مطالعه عددی را برای بررسی کامپوزیت های فوم فلزی/پارافین برای ذخیره انرژی در سامانه های برداشت کننده انرژی های تجدید پذیر انجام دادند. نتایج این محققان نشان می دهد که رسانایی حرارتی کامپوزیت های گفته شده به طور قابل توجهی نسبت به حالت پی سی ام تنها افزایش می یابد. مسالچی و همکاران [۲۰] در یک مطالعه عددی ترکیب ماتریس فلزی متخلخل پی سی ام را برای سامانه های حفاظت حرارتی و کاربردهای هوافضایی مورد مطالعه قرار دادند. یافته های این تحقیق نشان می دهد که وجود یک ماتریس متخلخل به طور قابل توجهی بر رفتار ذوب و نرخ انتقال حرارت پی سی ام تأثیر می گذارد. بارواج و همکاران [۲۱] یک مطالعه عددی در مورد عملکرد ساختارهای فوم فلزی/پارافین برای ذخیره سازی حرارتی در سامانه های انرژی تجدید پذیر انجام دادند. تحقیقات آن ها نشان داد که طراحی فوم فلزی نقش مهمی در فرایند ذوب و ویژگی های سیستم ذخیره سازی انرژی ایفا می کند. ال شاهر و همکاران [۲۲] امکان استفاده از سینک های حرارتی فین دار به همراه پی سی ام برای مدیریت حرارتی یک ماهواره کوچک را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، فین های پینی مثلثی شکل بهترین عملکرد حرارتی را نشان دادند. مهم ترین مطالعات انجام شده در خصوص بهبود انتقال حرارت در منابع ذخیره انرژی در جدول ۱ داده شده است.

مروری بر منابع انجام شده نشان می دهد که استفاده از پی سی ام روش کارآمدی برای مدیریت حرارت ماهواره های کوچک است؛ اما پی سی ام دارای قابلیت حرارتی پایینی هستند؛ بنابراین، محققان درصدد برآمدند که این نقص را اصلاح کنند. استفاده از فوم های فلزی می تواند این مشکل را تا حدودی برطرف کند. ماهواره ها با محدودیت وزنی مواجه هستند؛ بنابراین نمی توان به طور کامل هیت سینک را با مواد فوم های فلزی که چگالی و در نتیجه جرم بالایی دارند، استفاده کرد؛ بنابراین بهتر است از پره های متخلخل استفاده شود. از طرفی تاکنون تحقیقی مبنی بر مقایسه عملکرد پره های توپر یا جامد با پره های متخلخل انجام نشده است؛ بنابراین این مطالعه در نظر دارد که این خلأ تحقیقاتی را پر کند. از طرفی تحقیقات قبلی نشان داده اند که با افزایش طول و ضخامت پره، زمان ذوب افزایش می یابد. اما از طرفی فضا برای ذخیره انرژی کاهش می یابد. برای ایجاد موازنه بین این دو پارامتر و قضاوت بهتر، در این مقاله برای اولین بار پارامتر جدیدی به نام اثربخشی تعریف شده که این دو را با هم مقایسه می کند.

## ۲. بیان مسئله و مدل سازی ریاضی

مسئله شامل دو استوانه تو در تو است؛ که بین دو استوانه از ماده پی سی ام پر شده است (مطابق شکل ۱). همچنین تعدادی پره (متخلخل یا توپر مسی به عنوان مثال چهار پره در این شکل) بر روی استوانه داخلی قرار داده می شود. شعاع لوله داخلی ۵۰.۸ میلی متر ( $r_i$ ) و شعاع لوله بیرونی ( $r_o$ ) ۱۵۰ میلی متر است. جنس پره ها از مس به خاطر هدایت بالای حرارتی انتخاب شده است. طول و ضخامت پره ها موارد مورد بررسی در این مقاله هستند. در این تحقیق از ماده پی سی ام با نام تجاری RT82 استفاده شده است. خواص فیزیکی و ترمودینامیکی پی سی ام مورد استفاده در این مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است.



جدول ۱. موارد مطالعه شده در مقالات مختلف در مورد استفاده از پی‌سی‌ام با/بدون استفاده از پره‌های جامد/متخلخل

نام نویسنده	نوع کار	روش مورد استفاده	نتیجه
یزچی و همکاران [۲۳]	هندسه پوسته دارای لوله داخلی با خروج از مرکزهای مختلف	تأثیر خروج از مرکزهای مختلف لوله داخلی درون پوسته بر سرعت ذوب پی‌سی‌ام	سرعت ذوب بیشتر هندسه با لوله داخلی نزدیک به سطح پایینی پوسته
حسینی و همکاران [۲۴]	استفاده از پره‌های مستطیلی شکل در هندسه دایروی	استفاده از پره‌های مختلف مستطیلی شکل در اطراف دو لوله داخلی و خارجی	کاهش زمان ذوب با استفاده از شانزده پره
چن و همکاران [۲۵]	هندسه با دو پره مثلثی	استفاده از دو پره مثلثی با هندسه دارای محیط متخلخل	نانو پی‌سی‌ام با کسر حجمی ۱٪ زمان سرعت ذوب را بیشتر کاهش داد
تیان و همکاران [۲۶]	محفظه مستطیلی افقی دوبعدی با دو پره یکنواخت قرار گرفته به صورت عمودی	بررسی زمان سرعت ذوب با استفاده از دو پره ذکر شده	سریع‌تر شدن سرعت ذوب پی‌سی‌ام با استفاده از پره از جنس مس
ژو و همکاران [۲۷]	یک لوله متحدالمرکز با تخلخل	بررسی زمان سرعت ذوب با تخلخل در قسمت‌های مختلف لوله	سریع‌تر ذوب شدن پی‌سی‌ام در نیمه پایینی لوله با تخلخل
وانگ و همکاران [۲۸]	هندسه بدون پره، سه پره و چهار پره	تأثیر پره و زاویه بین آن‌ها بر سرعت ذوب	کمترین زمان ذوب در هندسه با سه پره و زاویه بین شصت تا نود درجه
ال عبیدی و همکاران [۲۹]	هندسه دایروی سه‌تایی دارای پره‌های داخلی-خارجی	تأثیر پره بر ذوب پی‌سی‌ام	کمر شدن زمان ذوب به دلیل افزایش هدایت حرارتی
فراهانی و همکاران [۳۰]	هندسه دایروی سه‌تایی	تأثیر پره بر ذوب پی‌سی‌ام غیر نیوتونی	کمر شدن زمان ذوب به دلیل افزایش هدایت حرارتی
مهدی و همکاران [۳۱]	هندسه دایروی دو لوله‌ای با سه نوع پی‌سی‌ام	تأثیر انواع پی‌سی‌ام بر فرآیند انجماد	کمر شدن زمان ذوب به دلیل اختلاف دما بین سطح سرد و نقطه دمای انجماد
لیو و همکاران [۳۲]	هندسه دو بعدی لوله دو تایی و لوله سه‌تایی با پره متخلخل	تأثیر پره متخلخل در فرآیند انجماد	کاهش عدد دارسی و در نتیجه آن افزایش سرعت انجماد پی‌سی‌ام
پینگ و همکاران [۳۳]	باتری لیتیومی با ساختار پی‌سی‌ام-فین	تأثیر پره بر بهبود عملکرد باتری	افزایش بازدهی باتری
آریچی و همکاران [۳۴]	هندسه دایروی با پی‌سی‌ام و پره	تأثیر پره بر زمان ذوب	کمر شدن زمان ذوب به دلیل افزایش هدایت حرارتی
حسینی‌زاده و همکاران [۳۵]	مبدل حرارتی شامل پره و پی‌سی‌ام	تأثیر پیکربندی‌های مختلف پره داخلی بر ذوب پی‌سی‌ام در مبدل حرارتی	بهبود عملکرد مبدل حرارتی
ژائو و همکاران [۳۶]	هندسه مستطیلی دارای پره عمودی	تأثیر پره بر زمان ذوب	کمر شدن زمان ذوب به دلیل افزایش هدایت حرارتی

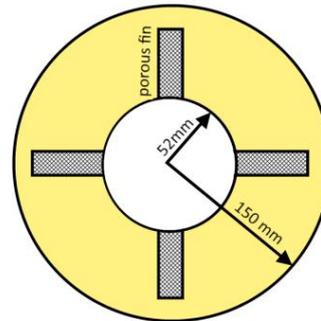


معادله مومنتوم در راستای محور x [۳۸]:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_{1x} + S_{2x} \quad (2)$$

معادله مومنتوم در راستای محور y [۳۸]:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_{1y} + S_{2y} + \rho g \beta (T - T_0) \quad (3)$$



شکل ۱. شماتیک مسئله مورد بررسی در این تحقیق

## ۱-۲. معادلات حاکم بر جریان سیال

در این مطالعه برای شبیه‌سازی فرایند ذوب از مدل آنتالپی-تخلخل استفاده شده است. همرفت طبیعی در ناحیه پی‌سی‌ام مذاب می‌تواند فرآیند ذوب و ذخیره انرژی حرارتی را بهبود ببخشد. در این تحقیق از تقریب بوزینسک برای شبیه‌سازی اثر نیروی شناوری در پی‌سی‌ام مذاب استفاده شده است. به خاطر سرعت پایین، حرکت پی‌سی‌ام مایع، جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است. بنابراین، جابجایی طبیعی تنها مکانیزم انتقال حرارت است که موجب حرکت پی‌سی‌ام مایع به سمت بالای هندسه و گردش آن در سراسر محیط اطراف خود می‌شود. معادلات حاکم مورد استفاده در مدل دینامیک سیالات محاسباتی در دستگاه دکارتی عبارتند از:

بقای جرم [۳۷]:

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

در مدل سی‌اف‌دی با رویکرد آنتالپی-تخلخل، ناحیه خمیری به‌عنوان محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود و کسر مایع پی‌سی‌ام در هر عنصر برابر فرض می‌شود. در نهایت،  $S_{1x}$  و  $S_{1y}$ ، که در ناحیه مذاب تعریف می‌شوند به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۹]:

$$S_{1x} = A_{mushy} \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} u \quad (4)$$

$$S_{1y} = A_{mushy} \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} v \quad (5)$$

که در آن  $\lambda$  نشان‌دهنده تغییر در کسر مایع است و با توجه به دمای پی‌سی‌ام مقداری بین ۰ و ۱ متغیر است [۳۹]:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & T < T_{Solid} \\ \frac{T - T_{Solid}}{T_{liquid} - T_{Solid}} & T_{solid} < T < T_{liquid} \\ 1 & T > T_{liquid} \end{cases} \quad (6)$$

جدول ۲. خواص مواد مورد استفاده در این تحقیق [۴۰]

ماده	ضریب انبساط حرارتی ( $\beta$ )	ویسکوزیته دینامیکی ( $\mu$ )	گرمای نهان ذوب ( $h_{sf}$ )	محدوده دمای ذوب ( $T_m$ )	ضریب هدایت حرارتی ( $k$ )	گرمای ویژه ( $C_p$ )	چگالی پی‌سی‌ام جامد	چگالی پی‌سی‌ام مایع
	(1/K)	(Pa.s)	(kJ/kg)	(K)	(W/mK)	(kJ/kg)	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
RT82	0.001	0.0349	176	350.15-358.15	0.2	2	950	770
مس	-	-	-	-	380	381	8978	-



$$Da = \frac{K}{R^2} \quad (12)$$

که در آن R شعاع هندسه دایروی بیرونی است.

## ۲-۲. شرایط اولیه و مرزی

برای تمام موارد مطالعه شده، دمای اولیه یک مقدار ثابت (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته می‌شود. همچنین دمای دیواره داخلی و خارجی (شرایط مرزی) سه دمای ۹۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۳. روش حل

برای حل معادلات گفته شده از نرم‌افزار انسیس فلونت نسخه ۲۰۲۱ بازبینی دوم استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل<sup>۱۲</sup> برای حل کوپل میان سرعت و فشار استفاده می‌شود. برای گسسته سازی فشار از طرح پرستو<sup>۱۳</sup> و برای گسسته سازی معادلات انرژی و مومنتوم نیز از طرح مرتبه دوم بالادست<sup>۱۴</sup> استفاده می‌شود. برای اطمینان از همگرایی حل، تکرارها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که باقیمانده‌ها به کمتر از  $10^{-7}$  برسد.

## ۲-۴. مطالعه استقلال مش

برای تولید شبکه نیز از نرم‌افزار انسیس مشینگ<sup>۱۵</sup> استفاده شده است. استقلال مش برای اطمینان از منحصربه‌فرد بودن نتایج به دست آمده انجام می‌شود. برای این مطالعه هندسه بدون پره در نظر گرفته شده است. استقلال حل از شبکه برای مش‌های مختلف با ابعاد ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ انجام شده و نتایج در شکل ۲ ارائه شده است. به منظور کاهش زمان محاسبات و بر اساس نمودار به دست آمده، مش ۲ میلی‌متر انتخاب شده و در ادامه مورد استفاده قرار داده شده است.

## ۲-۵. استقلال گام زمانی

گام زمانی حل می‌تواند بر دقت حل مسئله تأثیرگذار باشد. گام زمانی بسیار بزرگ باعث

منطقه خمیری شکل که با پارامتر  $A_{mushy}$  نشان مدل می‌شود. در این مطالعه مقدار این پارامتر  $10^5$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده تا شبیه‌سازی سی‌اف‌دی بهترین تطابق با داده‌های تجربی داشته باشد. ترم‌های  $S_{2x}$  و  $S_{2y}$  ترم‌های مربوط به نیروی ترمزی هستند که توسط محیط متخلخل (پره‌ها) به جریان وارد می‌شوند. اگر این ترم‌ها را به صورت کلی S نمایش دهیم، این جمله به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۱]:

$$S_{2x,y} = \left( \frac{\mu_f}{K} + \frac{1/75 \rho_f}{\sqrt{150 \varepsilon^3 K}} |\vec{V}| \right) \vec{V} \quad (7)$$

معادله پایستگی انرژی [۴۱]:

$$\rho \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uH) + \frac{\partial}{\partial y} (vH) \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (8)$$

که  $\rho$ ،  $P$ ،  $\beta$ ،  $T_0$ ،  $\mu$ ،  $t$ ،  $g$  و  $k$  به ترتیب چگالی، فشار، ضریب انبساط حرارتی، دمای مرجع، زمان، ویسکوزیته دینامیکی، شتاب ناشی از گرانش و هدایت حرارتی هستند. در نهایت، آنتالپی کل، H را می‌توان به صورت ترکیبی از گرمای محسوس و نهان به صورت زیر نشان داد:

$$H = h + \Delta H \quad (9)$$

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T C_p dT \quad (10)$$

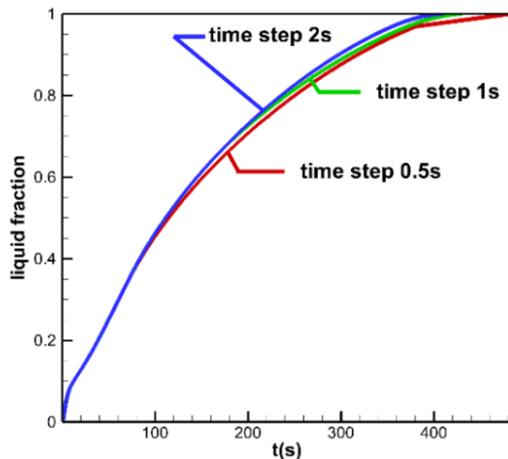
تغییرات در آنتالپی ناشی از تغییر فاز پی‌سی‌ام بر حسب گرمای نهان را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta H = \lambda h_{sf} \quad (11)$$

که در آن L گرمای نهان پی‌سی‌ام است؛ این پارامتر بین صفر برای پی‌سی‌ام جامد و L برای پی‌سی‌ام مایع تغییر می‌کند. عدد دارسی در محیط متخلخل نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۲]:



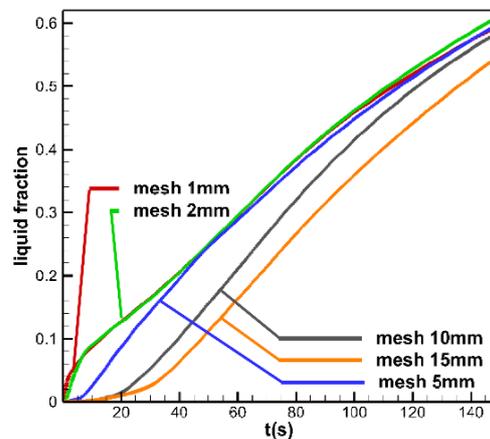
دیواره‌های عایق شده) انجام دادند.



شکل ۳. مطالعه استقلال حل از گام زمانی

نتایج این تحلیل به صورت عددی نیز توسط فدل و ایمز [۴۵] شبیه‌سازی شده است. هندسه مورد نظر یک مستطیل ۱۵ میلی‌متر در ۷/۵ میلی‌متر است که طولانی‌ترین ضلع آن به صورت افقی قرار گرفته است. سطح پایینی ظرف در دمای ثابت (۷۰ درجه سانتی‌گراد) است و سایر سطوح عایق است. از شکل ۳ مشاهده می‌شود که مطالعه حاضر به خوبی از مطالعه تجربی پیروی می‌کند به جز مراحل پایانی که مطالعه عددی مقداری انحراف دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی تقریباً ۵ دقیقه زودتر به شرایط شارژ کامل رسیده است (حدود ۰.۵٪ اختلاف). این انحراف ممکن است به دلیل تفاوت بین خواص ماده واقعی و آنچه در این مطالعه فرض شده است باشد. همچنین روش‌های عددی به دلیل محدودیت‌هایی که دارند نمی‌توانند به طور کامل کارهای آزمایشگاهی را پیش‌بینی کنند. ضمن این‌که، کارهای آزمایشگاهی نیز خود با عدم قطعیت‌هایی مواجه هستند. با این حال، می‌توان گفت که نتایج عددی دارای دقت مناسبی هستند.

می‌شود که حل ناپایدار شده و از دقت آن کاسته شود، چراکه برخی جزئیات حل در گام‌های زمانی بزرگ حذف می‌شوند. از طرفی گام‌های زمانی بسیار کوچک نیز زمان و هزینه محاسباتی را زیاد می‌کند؛ بنابراین باید یک گام زمانی مناسب انتخاب شود که بین این دو وضعیت تعادل برقرار کرده و دقت کافی نیز داشته باشد. این موضوع لزوم انجام یک مطالعه استقلال حل از گام زمانی را نشان می‌دهد. در این پژوهش، تحلیل استقلال حل از گام زمانی برای سه گام زمانی مختلف شامل ۰/۵، ۱ و ۲ ثانیه انجام شد. شکل ۳ تغییر کسر مایع را برای گام‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با تغییر مرحله زمانی، تغییر قابل‌توجهی در نتایج کسر مذاب مشاهده نشده است. در نتیجه، گام زمانی ۱ ثانیه برای بقیه شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. در مقالات و منابع نیز گام زمانی برای حل جریان‌های مربوط به پی‌سی‌ام نیز در همین محدوده در نظر گرفته شده است [۴۳].



شکل ۲. مطالعه استقلال حل از شبکه

## ۲-۶. اعتبارسنجی

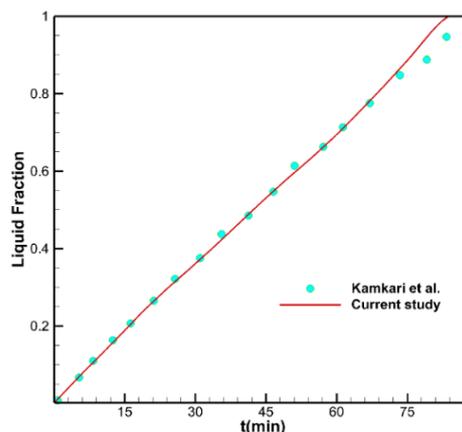
کامکاری و همکاران [۴۴] تحقیقات تجربی بر روی فرآیند ذوب اسید لائوریک<sup>۱۶</sup>، به عنوان پی‌سی‌ام، در داخل یک ظرف (با یک طرف در دمای ثابت ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سایر

## ۲-۷. تعریف پارامتر اثربخشی

تا حدودی می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش حجم پره‌ها انتقال حرارت بهبود یافته و در نتیجه فرایند ذوب تسریع می‌شود؛ اما مسئله اینجاست که با افزایش حجم پره‌ها، بخش فلزی افزایش پیدا کرده و در نتیجه حجم پی‌سی‌ام و گرمای نهان ذخیره شده ناشی از ذوب پی‌سی‌ام (که هدف از طراحی مخزن نیز همین بوده است) کاهش می‌یابد. در نتیجه باید پارامتری تعریف کرد که بتواند دستاورد افزودن پره اضافه در بهبود زمان ذوب نسبت به هزینه اضافه را نشان دهد. پره ضخیم‌تر یا بلندتر به معنای هزینه بالاتر برای خرید مواد رسانای حرارتی بالا و هزینه‌های تولید بالاتر است؛ بنابراین یک پارامتر جدید به نام پارامتر اثربخشی در این مطالعه تعریف شده است. لازم به ذکر است که این پارامتر که برای اولین بار توسط محققین این مقاله تعریف شده به صورت یک کسر تعریف می‌شود که صورت آن نشان-دهنده نسبت حجم پی‌سی‌ام در صورت استفاده از پره نسبت به وضعیت بدون پره است. چون با اضافه شدن پره حجم پی‌سی‌ام کاهش می‌یابد، صورت این کسر همواره عددی کمتر از یک است؛ بنابراین اضافه شدن پره تمایل به کاهش پارامتر اثربخشی دارد. مخرج کسر اثربخشی نسبت زمان ذوب در صورت استفاده از پره به حالت بدون پره را نشان می‌دهد. با این توصیف کسر اثربخشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

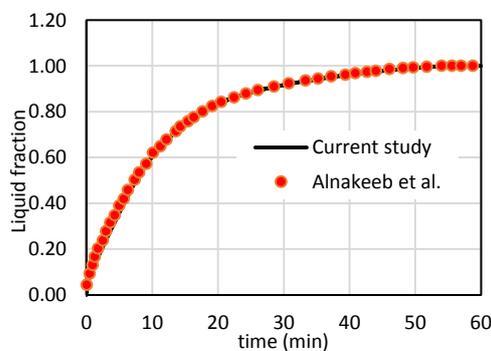
$$FP = \frac{v_p/v_0}{t_p/t_0} \quad (13)$$

که در آن  $v_p$  و  $v_0$  به ترتیب نشان‌دهنده حجم پی‌سی‌ام با پره‌ی متخلخل و حجم پی‌سی‌ام درون هندسه بدون پره است. همین‌طور اندیس‌های مربوط به مخرج نیز دارای شرایط مشابهی هستند. هدف، کاهش زمان ذوب کلی پی‌سی‌ام با حداکثر اثربخشی است که نیازمند به حداقل رساندن مخرج و افزایش حجم پی‌سی‌ام در صورت است.



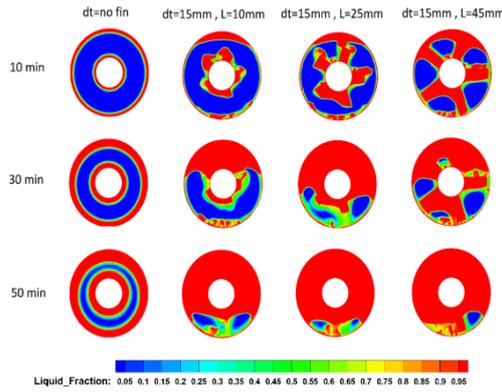
شکل ۳. اعتبارسنجی کار فعلی با مطالعه کامکاری و همکاران [۴۴]

برای اطمینان از درستی حل، همچنین از تحقیقات الناکیب و همکاران [۴۶] برای اعتبارسنجی رویه جاری استفاده شده است. هندسه مورد استفاده در این تحقیق یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای شامل یک لوله داخلی با قطر ۲۳ میلی‌متر و یک لوله خارجی با قطر ۴۰ میلی‌متر است. پی‌سی‌ام مورد استفاده آن ایکوزان است که در فضای بین لوله داخلی و پوسته خارجی قرار می‌گیرد. سیال عامل حرارت که آب گرم است از طریق لوله داخلی جریان می‌یابد. دمای لوله داخلی در ۵۶/۱۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند، درحالی‌که سطح بیرونی حلقه عایق است. مقایسه مطالعه حاضر و مرجع در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سازگاری خوبی بین نتایج وجود دارد.

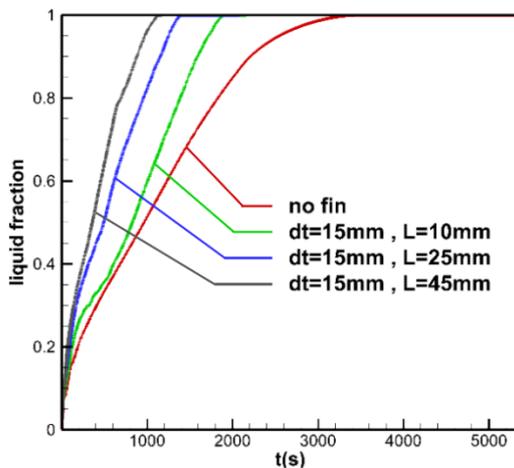


شکل ۴. اعتبارسنجی کار فعلی با مطالعه الناکیب و همکاران [۴۶]

### ۳. نتایج و بحث



شکل ۵. تأثیر طول پره‌های متخلخل بر فرایند ذوب پی‌سی‌ام با دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس و  $Da=0.1$



شکل ۶. کسر مذاب هندسه با پره متخلخل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر در طول‌های مختلف و دمای ۱۴۰ درجه و  $Da=0.1$

جدول ۳. تأثیر طول پره طول پره بر زمان ذوب و اثربخشی

FP	زمان ذوب (min)	طول پره (mm)	ضخامت پره (mm)	تعداد پره
-	۱۱۱۰٫۷۳	-	-	۰
۱٫۷۶	۶۳٫۲	۱۰	۱۵	۵
۲٫۳۶	۴۶٫۶	۲۵	۱۵	۵
۲٫۹۱	۳۷٫۵	۴۵	۱۵	۵

#### ۳-۲. تأثیر ضخامت بر فرایند ذخیره حرارت

کسر مذاب در شکل ۷ برای ضخامت‌های مختلف در طول ۱۵ میلی‌متر ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که تغییر فاز پی‌سی‌ام با افزایش ضخامت پره متخلخل به دلیل افزایش هدایت

#### ۳-۱. تأثیر طول پره متخلخل فرایند ذوب

شکل ۵ تأثیر طول پره با ابعاد مختلف در ضخامت ۱۵ میلی‌متر را بر کسر مذاب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ده دقیقه اول، پی‌سی‌ام اطراف پره‌ها به دلیل هدایت حرارتی بالا و منتقل شدن مذاب تشکیل شده از درون منافذ پره‌های متخلخل به فضای بیرون از پره‌ها، سریع‌تر ذوب شده‌اند. پس از گذشت ۳۰ دقیقه از ذوب پی‌سی‌ام، به دلیل نیروی شناوری ناشی از انتقال حرارت همرفتی، در تمامی موارد، قسمت بالایی فضای میان لوله‌ها و پره‌ها تقریباً ذوب شده‌اند و در نهایت پس از ۵۰ دقیقه با پیشروی دوباره انتقال حرارت هدایتی، نواحی پایین لوله میانی نیز به تدریج ذوب می‌شوند. پره با طول ۱۰ و ۴۵ میلی‌متر به ترتیب طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین زمان ذوب را داشتند. شکل ۶ زمان ذوب پی‌سی‌ام را در هندسه با ضخامت ۱۵ میلی‌متر در طول‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پی‌سی‌ام در هندسه با پره متخلخل در طول ۴۵ میلی‌متر در مدت زمان تقریبی ۱۳ دقیقه کوتاه‌ترین زمان ذوب را نسبت به پره با طول‌های دیگر دارد که نشان از تأثیر طول پره بر ذوب پی‌سی‌ام دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول پره به دلیل بیشتر شدن هدایت حرارتی و تسهیل انتقال حرارت به نواحی دورتر از پره‌ها زمان ذوب کاهش می‌یابد. جدول ۳ زمان نهایی ذوب ۵ پره متخلخل در ضخامت ۱۵ میلی‌متر با طول‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش طول پره‌ها اثربخشی نیز افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که تأثیر افزودن پره بر بهبود زمان ذوب بیشتر از کاهش فضا برای پی‌سی‌ام است.





حرارتی بهبود می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان‌های اولیه در هندسه بدون پره، پی‌سی‌ام در نزدیکی سطح ناحیه انتقال حرارت ذوب می‌شود و ذوب متقارن در تمامی زمان‌ها مشاهده می‌شود. این بدین معنی که به دلیل رسانایی ضعیف پی‌سی‌ام، فرایند ذوب به‌کندی انجام می‌شود و در نتیجه به خاطر کم بودن حجم پی‌سی‌ام مایع انتقال حرارت همرفتی ناچیز شده است. همچنین مشاهده می‌شود که ناحیه مذاب هندسه با چهارپره متخلخل در ضخامت ۱۵ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۲۵ میلی‌متر در تمامی زمان‌ها به‌طور متقارن تشکیل شده که دلیل آن، توزیع یکنواخت گرما از طریق پره‌های متخلخل به ناحیه جامد پی‌سی‌ام و ذوب آن است. سپس پی‌سی‌ام مایع به علت نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند و موجب افزایش انتقال حرارت همرفتی و در نتیجه، افزایش مذاب و کاهش زمان ذوب می‌شود.

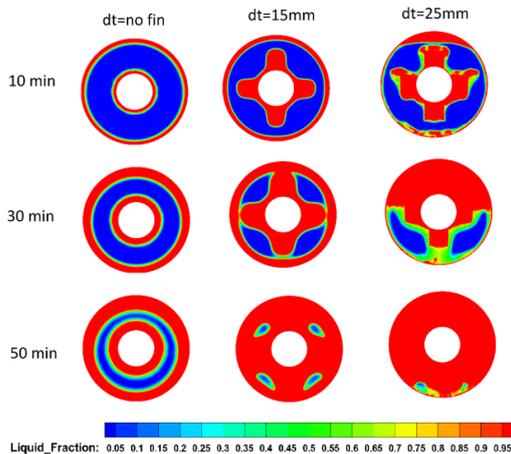
### ۳-۳. تأثیر دما بر فرایند ذخیره گرمای نهان

شکل ۸ پارامتر اثربخشی برای مقادیر مختلف دما مختلف در مرزها برای پره‌های با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و عدد دارسی ۰/۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پره متخلخل با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و دمای ۱۲۰ درجه نسبت به دمای ۱۴۰ درجه به دلیل کمتر شدن پارامتر مخرج (رابطه ۱۳) که نشان‌دهنده‌ی نسبت زمان ذوب هندسه با پره متخلخل به حالت بدون پره است، بیشترین اثربخشی را دارد.

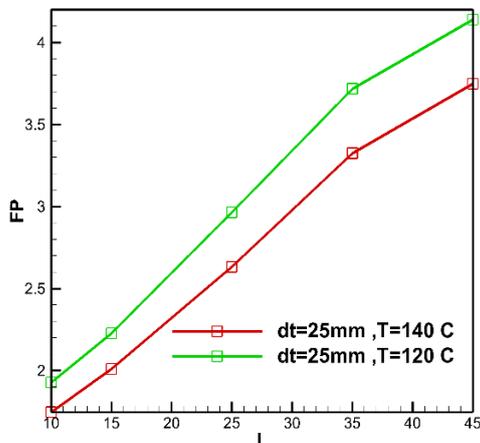
### ۳-۴. تأثیر عدد دارسی

عدد دارسی یک پارامتر مؤثر در حرکت سیال درون مواد متخلخل است که میزان نفوذپذیری سیال درون ماده را نشان می‌دهد. لذا این پارامتر بر مسیر حرکت سیال تأثیرگذار است. در جدول ۴ تأثیر عدد دارسی در طول‌ها و ضخامت‌های

مختلف بر زمان ذوب و پارامتر اثربخشی در حالت پنج پره نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش عدد دارسی به مقدار خیلی اندکی زمان ذوب و پارامتر اثربخشی در تمامی حالت‌ها بهبود نشان می‌دهد.



شکل ۷. اثر ضخامت بر فرایند ذوب در هندسه با چهار پره متخلخل در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و  $Da=0.1$  و طول ۱۵ میلی‌متر



شکل ۸. اثربخشی پره متخلخل بر ذوب پی‌سی‌ام در طول و دماهای مختلف و  $Da=0.1$  برای هندسه شامل چهار پره متخلخل

### ۳-۵. مقایسه عملکرد پره‌های متخلخل و پره توپر

شکل ۹، مقایسه اثربخشی پره توپر و پره متخلخل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر در دو دمای ۱۴۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که

مشاهده می‌شود، اثربخشی پره متخلخل نسبت به پره توپر ۱۷ درصد بهبود یافته است. پره متخلخل نسبت به پره توپر به دلیل بیشتر بودن پارامتر صورت (نسبت حجم پی‌سی‌ام پره متخلخل به حجم پی‌سی‌ام بدون پره) اثربخشی بهتری دارد؛ بنابراین اگرچه پی‌سی‌ام هندسه با پره توپر زمان ذوب کمتری نسبت به پره متخلخل دارد، پره متخلخل با وجود حجم بیشتر پی‌سی‌ام و اختلاف ناچیز زمان ذوب نسبت به پره توپر دارای اثربخشی موثرتری است.

جدول ۴. تأثیر عدد دارسی بر زمان ذوب و پارامتر اثربخشی برای شرط مرزی دمایی ۱۴۰ درجه سانتیگراد

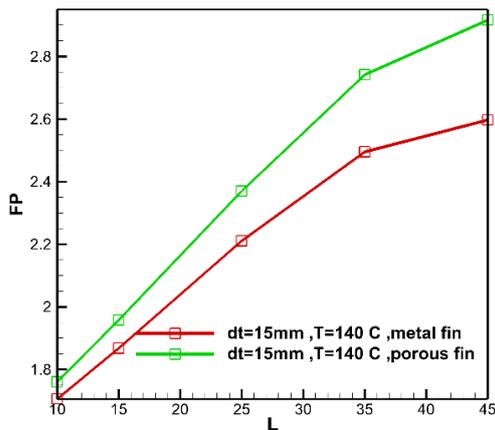
عدد دارسی	ضخامت (mm)	طول (mm)	زمان ذوب (s)	$(\frac{v}{v_0})$	FP
بدون پره	-	-	۱۱۱/۷	-	-
۰/۱	۱۵	۱۰	۶۳/۲	۰/۹۹۵	۱/۷۶
۰/۱	۱۵	۴۵	۳۷/۵	۰/۹۷۸	۲/۹۱
۰/۱	۲۵	۱۰	۶۳/۶۳	۰/۹۹۳	۱/۷۴
۰/۱	۲۵	۴۵	۲۸/۸	۰/۹۶۵	۳/۷۴
۰/۰۰۱	۱۵	۱۰	۶۲/۷	۰/۹۹۵	۱/۷۷
۰/۰۰۱	۱۵	۴۵	۳۷/۲۳	۰/۹۷۸	۲/۹۳
۰/۰۰۱	۲۵	۱۰	۶۴/۶۳	۰/۹۹۳	۱/۷۱
۰/۰۰۱	۲۵	۴۵	۲۹/۱۶	۰/۹۶۵	۳/۷۰

### ۳-۶. اثر تعداد پره‌ها (متخلخل) بر ذوب

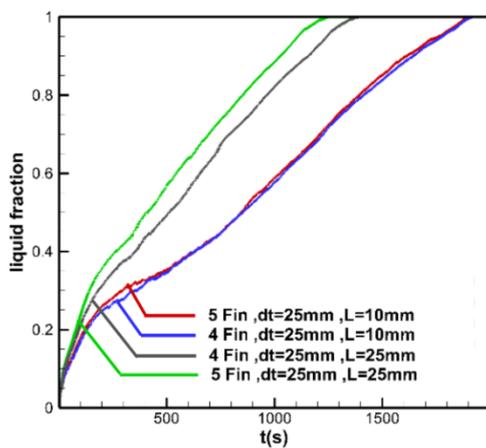
اثر تعداد پره برای دو طول مختلف در برای وضعیت ۴ پره و ۵ پره در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که وقتی طول پره‌ها زیاد می‌شود، زمان ذوب به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند در صورتیکه برای طول‌های کمتر این تغییر چشمگیر نیست.

رفتار کسر مایع ملاحظه شده در شکل ۱۰ تا حدودی مشابه رفتار مشاهده شده در منابع منتشر شده است. به عنوان مثال در مقاله منتشر شده توسط ژائو و همکاران [۴۷] که هندسه نسبتاً مشابهی را بررسی کرده‌اند نیز این رفتار دیده

می‌شود. بخش اول نمودار شیب قابل توجهی دارد که به خاطر مکانیزم انتقال حرارت هدایتی در نواحی نزدیک به پره‌هاست. با ادامه فرایند، به تدریج انتقال حرارت هدایتی تضعیف شده و فرایند جابجایی اجباری غالب می‌شود. با توجه به حجم پی‌سی‌ام سرعت و تأثیر فرایند ذوب که تحت تأثیر مکانیزم انتقال حرارت است، متفاوت شده و در نتیجه شیب نمودار تغییر می‌کند.



شکل ۹: مقایسه ضریب تأثیر هندسه با ۵ پره توپر و متخلخل ( $Da=0.1$ ) در ضخامت‌های و دماهای یکسان و طول‌های مختلف پره



شکل ۱۰: مقایسه کسر مذاب هندسه با ۴ و ۵ پره متخلخل در ضخامت و دمای یکسان و  $Da=0.1$

### ۴. نتیجه‌گیری

پی‌سی‌ام انتخاب‌های بسیاری مناسبی برای ذخیره حرارت در دماهای پایین هستند. اما این





مواد دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار پایینی‌اند. بنابراین قادر نیستند که حرارت را سریع در دامنه خود پخش کرده و ذوب را در اسرع وقت انجام دهند. بنابراین راه‌حل‌های مختلفی برای این کار توسط محققین ارائه شده است. این مقاله به دنبال استفاده از پره‌های متخلخل به منظور بهبود این فرایند است. از طرفی اگرچه با استفاده از پره‌های توپر یا متخلخل می‌توان فرایند پخش حرارت را بهبود بخشید، اما، بدون شک این پره‌ها فضای ذخیره ماده پی‌سی‌ام را اشغال می‌کنند و بنابراین انرژی کمتری را در این فضای محدود شده می‌توان ذخیره کرد. بنابراین در این مقاله پارامتر جدیدی به نام اثربخشی تعریف شده که میزان پی‌سی‌ام ذخیره شده به زمان ذوب را نشان می‌دهد. هرچقدر این پارامتر بزرگ‌تر باشد یعنی پی‌سی‌ام بیشتری در زمان کمتری ذوب شده است. اثر پارامترهای مختلفی نظیر طول و ضخامت پره‌های متخلخل، شرایط مرزی دمایی، جنس پره‌های متخلخل (اثر نفوذپذیری)، و نوع پره بررسی شد که نتایج آن به صورت خلاصه به صورت زیر ارائه می‌شود:

- با بیشتر شدن ضخامت و طول پره‌ها، زمان ذوب بهبود می‌یابد. اما با توجه به شرایط مرزی و هندسه ممکن پارامتر اثربخشی کاهش یا افزایش پیدا کند.
- در بین دو عدد داری بررسی شده، پره متخلخل با عدد داری کوچک‌تر عملکرد بهتری داشت.
- استفاده از پره در دماهای کمتر بیشتر توصیه می‌شود چراکه نتایج تحقیق نشان داد که پره‌ها در دماهای پایین‌تر اثربخشی بیشتری دارند.
- پره‌های متخلخل بهتر از پره‌های توپر هستند چراکه اثربخشی بهتری را از خود نشان دادند.

## ۵. فهرست علائم

پارامتر مربوط به منطقه خمیری $[kg/m^3]$	$A_{mushy}$
گرمای ویژه پی‌سی‌ام $[kg/J.C]$	$C_p$
ضخامت $[m]$	$dt$
عدد داری	$Da$
پارامتر اثر بخشی	$FP$
شتاب گرانش $[m/s^2]$	$g$
آنتالپی کل $[kJ/kg]$	$H$
آنتالپی مخصوص $[kJ/kg]$	$h$
گرمای نهان ذوب $[kJ/kg]$	$h_{sf}$
رسانش گرمایی $[W/mK]$	$k$
نفوذ پذیری $[m^2]$	$K$
گرمای نهان ذوب $[J/kgK]$	$L$
فشار $[Pa]$	$P$
زمان $[s]$	$t$
دما $[K]$	$T$
شعاع $[m]$	$R$
ترم چاه در معادله مومنتوم $[N/m^3]$	$S$
حجم $[m^3]$	$v$
مختصات $[m]$	$x,y$
ضریب انبساط حرارتی $[1/K]$	$\beta$
تخلخل	$\varepsilon$
چگالی $[kg/m^3]$	$\rho$
کسر مایع	$\lambda$
ویسکوزیته دینامیکی $[kg/m.s]$	$\mu$
زیر نویس	
حالت بدون پره، محیط	$0$
مایع	liquid
سیال	$f$
ذوب	$m$
حالت با پره	$p$
جامد	solid

13, No. 1, 2023, p. 10955.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-37639-3>

- [9] Lawag, R. A., Ali, H. M., Zahir, M. H., and Qureshi, B. A., "Investigation of PT 58 and PEG-6000-Based Finned Heat Sinks for Thermal Management of Electronics," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 390, 2023, p. 136101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136101>
- [10] Ho, J. Y., See, Y. S., Leong, K. C., and Wong, T. N., "An Experimental Investigation of a PCM-Based Heat Sink Enhanced with a Topology-Optimized Tree-like Structure," *Energy Conversion and Management*, Vol. 245, 2021, p. 114608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114608>
- [11] Pássaro, J., Rebola, A., Coelho, L., Conde, J., Evangelakis, G. A., Prouskas, C., Papageorgiou, D. G., Zisopoulou, A., and Lagaris, I. E., "Effect of Fins and Nanoparticles in the Discharge Performance of PCM Thermal Storage System with a Multi Pass Finned Tube Heat Exchange," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 212, 2022, p. 118569. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118569>
- [12] Pakrouh, R., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., and Bahrampoury, R., "A Numerical Method for PCM-Based Pin Fin Heat Sinks Optimization," *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, 2015, pp. 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.003>
- [13] Zhou, Z., Hu, Z., Wang, D., and Wu, H., "Visualized-Experimental Investigation on the Melting Performance of PCM in 3D Printed Metal Foam," *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 31, 2022, p.101298. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101298>
- [14] Hu, X., Gong, X., Zhu, F., Xing, X., Li, Z., and Zhang, X., "Thermal Analysis and Optimization of Metal Foam PCM-Based Heat Sink for Thermal Management of Electronic Devices," *Renewable Energy*, Vol. 212, 2023, pp. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.021>
- [15] Yu, J., Wang, Y., Qi, C., and Zhang, W., "Photothermal and Thermoelectric Performance of PCMs Doped with Nanoparticles and Metal Foam," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 143, 2023, p.
- [1] Liu, T., Sun, Q., Meng, J., Pan, Z., and Tang, Y., "Degradation Modeling of Satellite Thermal Control Coatings in a Low Earth Orbit Environment," *Solar Energy*, Vol. 139, 2016, pp. 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.031>
- [2] Wang, C.-H., Huang, J.-D., and Chen, C.-R., "Numerical Study on the Thermal Control of the TriG Receiver for FORMOSAT-7 Satellite," *Procedia Engineering*, Vol. 79, 2014, pp. 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.344>
- [3] Sharaf, M., Yousef, M. S., and Huzayyin, A. S., "Year-Round Energy and Exergy Performance Investigation of a Photovoltaic Panel Coupled with Metal Foam/Phase Change Material Composite," *Renewable Energy*, Vol. 189, 2022, pp. 777–789. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.071>
- [4] Peterson, G. P., "Thermal Control Systems for Spacecraft Instrumentation," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 24, No. 1, 1987, pp. 7–13. <https://doi.org/10.2514/3.25866>
- [5] Lee, Y.-T., Chien, L.-H., Cheung, F.-B., and Yang, A.-S., "Numerical and Experimental Investigations on Melting Heat Transfer Performance of PCM in Finned Cold Thermal Energy Storage," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 210, 2023, p. 124199. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124199>
- [6] S, A., Sharma, A., and Kothadia, H. B., "Performance Analysis of PCM Melting in a Fin-Assisted Thermal Energy Storage System – A Numerical Study," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 144, 2023, p. 106747. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106747>
- [7] Liu, H., Jin, C., Li, H., and Ji, Y., "A Numerical Study of PCM Battery Thermal Management Performance Enhancement with Fin Structures," *Energy Reports*, Vol. 9, 2023, pp. 1793–1802. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.214>
- [8] Elshaer, A. M., Soliman, A. M. A., Kassab, M., and Hawwash, A. A., "Boosting the Thermal Management Performance of a PCM-Based Module Using Novel Metallic Pin Fin Geometries: Numerical Study," *Scientific Reports*, Vol.



- Control Module at Microgravity Conditions,” *International Journal of Thermofluids*, Vol. 20, 2023, p. 100419. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100419>
- [23] Yusuf Yazıcı, M., Avcı, M., Aydın, O., and Akgun, M., “Effect of Eccentricity on Melting Behavior of Paraffin in a Horizontal Tube-in-Shell Storage Unit: An Experimental Study,” *Solar Energy*, Vol. 101, 2014, pp. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.07>
- [24] Hossieni, M. M., and Rahimi, A. B., “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, 2020, pp. 239–251. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5604.1369>
- [25] Chen, S.-B., Saleem, S., Alghamdi, M. N., Nisar, K. S., Arsalanloo, A., Issakhov, A., and Xia, W.-F., “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, 2021, p. 100939. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100939>
- [26] Tian, L.-L., Liu, X., Chen, S., and Shen, Z.-G., “Effect of Fin Material on PCM Melting in a Rectangular Enclosure,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167, 2020, p. 114764. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114764>
- [27] Xu, Y., Ren, Q., Zheng, Z.-J., and He, Y.-L., “Evaluation and Optimization of Melting Performance for a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit Partially Filled with Porous Media,” *Applied Energy*, Vol. 193, 2017, pp. 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.019>
- [28] Wang, P., Yao, H., Lan, Z., Peng, Z., Huang, Y., and Ding, Y., “Numerical Investigation of PCM Melting Process in Sleeve Tube with Internal Fins,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, 2016, pp. 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.042>
- [29] Mat, S., Al-Abidi, A.A., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. and Mohammad, A.T., 2013. "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins". *Energy conversion and management*, Vol. 74, pp.223-236. 106712. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106712>
- [16] Elshaer, A. M., Soliman, A. M. A., Kassab, M., Mori, S., and Hawwash, A. A., “Experimental Investigations on Copper Foam/PCM Composite-Based Thermal Control Hardware (TCH) Using Foam Samples with Different Pore Sizes under Intermittent Thermal Conditions,” *Journal of Energy Storage*, Vol. 72, 2023, p.108320. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108320>
- [17] Ali, H. M., “An Experimental Study for Thermal Management Using Hybrid Heat Sinks Based on Organic Phase Change Material, Copper Foam and Heat Pipe,” *Journal of Energy Storage*, Vol. 53, 2022, p.105185. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105185>
- [18] Swaminathan Gopalan, K., and Eswaran, V., “Numerical Investigation of Thermal Performance of PCM Based Heat Sink Using Structured Porous Media as Thermal Conductivity Enhancers,” *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 104, 2016, pp. 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.008>
- [19] Wang, G., Wei, G., Xu, C., Ju, X., Yang, Y., and Du, X., “Numerical Simulation of Effective Thermal Conductivity and Pore-Scale Melting Process of PCMs in Foam Metals,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 147, 2019, pp. 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.106>
- [20] Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., and Bowman, K., “Numerical Study for Enhancing the Thermal Conductivity of Phase Change Material (PCM) Storage Using High Thermal Conductivity Porous Matrix,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, No. 6, 2005, pp. 847–867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.010>
- [21] Baruah, J. S., Athawale, V., Rath, P., and Bhattacharya, A., “Melting and Energy Storage Characteristics of Macro-Encapsulated PCM-Metal Foam System,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 182, 2022, p. 121993. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121993>
- [22] Elshaer, A. M., Soliman, A. M. A., Kassab, M., Mori, S., and Hawwash, A. A., “Numerical Study about Thermal Performance Evaluation of PCM and PCM/Fins Composite-Based Thermal



- [37] Talesh Bahrami, H. R., Aminian, E., and Saffari, H., "Energy Transfer Enhancement Inside an Annulus Using Gradient Porous Ribs and Nanofluids," *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 142, No. 12, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4047312>
- [38] Nie, C., Deng, S., and Liu, J., "Numerical Investigation of PCM in a Thermal Energy Storage Unit with Fins: Consecutive Charging and Discharging," *Journal of Energy Storage*, Vol. 29, 2020, p.101319. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101319>
- [39] Mahdi, J. M., and Nsofor, E. C., "Solidification of a PCM with Nanoparticles in Triplex-Tube Thermal Energy Storage System," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, 2016, pp. 596–604.
- [40] Hossieni, M. M., and Rahimi, A. B., "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, 2020, pp. 239–251. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5604.1369>
- [41] Farahani, S. D., Farahani, A. D., and Mosavi, A. H., "Numerical Simulation of NEPCM Series Two-Layer Solidification Process in a Triple Tube with Porous Fin," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, 2021, p. 101407.
- [42] Bahrami, H. R., "Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer behind a Two-Dimensional Backward-Facing Step Equipped with a Semi-Porous Baffle," *Journal of Central South University*, Vol. 28, No. 11, 2021, pp. 3354–3367. <https://doi.org/10.1007/s11771-021-4860-1>
- [43] Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., Sedighi, K., and Rahimi, M., "A Combined Experimental and Computational Study on the Melting Behavior of a Medium Temperature Phase Change Storage Material inside Shell and Tube Heat Exchanger," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 9, 2012, pp. 1416–1424. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.028>
- [44] Kamkari, B., Shokouhmand, H., and Bruno, F., "Experimental Investigation of the Effect of Inclination Angle on Convection-Driven Melting of Phase Change Material in a Rectangular <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.003>
- [30] Farahani, S. D., Farahani, A. D., Tayebzadeh, F., and Mosavi, A. H., "Melting of Non-Newtonian Phase Change Material in a Finned Triple-Tube: Efficacy of Non-Uniform Magnetic Field," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, 2021, p. 101543. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101543>
- [31] Mahdi, J. M., Mohammed, H. I., Hashim, E. T., Talebizadehsardari, P., and Nsofor, E. C., "Solidification Enhancement with Multiple PCMs, Cascaded Metal Foam and Nanoparticles in the Shell-and-Tube Energy Storage System," *Applied Energy*, Vol. 257, 2020, p. 113993. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113993>
- [32] Liu, Z., Yao, Y., and Wu, H., "Numerical Modeling for Solid-Liquid Phase Change Phenomena in Porous Media: Shell-and-Tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage," *Applied Energy*, Vol. 112, 2013, pp.1222–1232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.022>
- [33] Ping, P., Peng, R., Kong, D., Chen, G., and Wen, J., "Investigation on Thermal Management Performance of PCM-Fin Structure for Li-Ion Battery Module in High-Temperature Environment," *Energy Conversion and Management*, Vol. 176, 2018, pp. 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.025>
- [34] Arıcı, M., Tütüncü, E., Yıldız, Ç., and Li, D., "Enhancement of PCM Melting Rate via Internal Fin and Nanoparticles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 156, 2020, p. 119845. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119845>
- [35] Hosseinizadeh, S. F., Tan, F. L., and Moosania, S. M., "Experimental and Numerical Studies on Performance of PCM-Based Heat Sink with Different Configurations of Internal Fins," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17, 2011, pp.3827–3838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.031>
- [36] Zhao, C., Wang, J., Sun, Y., He, S., and Hooman, K., "Fin Design Optimization to Enhance PCM Melting Rate inside a Rectangular Enclosure," *Applied Energy*, Vol. 321, 2022, p. 119368. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119368>



Enclosure,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, 2014, pp. 186–200.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.014>

- [45] Fadl, M., and Eames, P. C., “Numerical Investigation of the Influence of Mushy Zone Parameter Amush on Heat Transfer Characteristics in Vertically and Horizontally Oriented Thermal Energy Storage Systems,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 151, 2019, pp. 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.102>
- [46] Alnakeeb, M. A., Salam, M. A. A., and Hassab, M. A., “Eccentricity Optimization of an Inner Flat-Tube Double-Pipe Latent-Heat Thermal Energy Storage Unit,” *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 25, 2021, p. 100969.
- [47] Zhao, C., Opolot, M., Liu, M., Bruno, F., Mancin, S., and Hooman, K., “Numerical Study of Melting Performance Enhancement for PCM in an Annular Enclosure with Internal-External Fins and Metal Foams,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150, 2020, p.119348. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119348>

## ۷. پی‌نوشت

- 1.Active Methods
- 2.Passive Methods
- 3.Radiators
4. Multi-Layer Insulations
5. Phase Change Materials (پی‌سی‌ام)
6. Thermoelectric Coolers
7. Louvres
8. Thermal Energy Storage
9. Sensible Energy Storage (SES)
10. Latent Energy Storage (LES)
11. N-Eicosane
12. SIMPLE
13. PRESTO!
14. Second order upwind
15. Ansys Meshing
16. Lauric

۴۸

سال ۱۳- شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



مبدل حرارتی دولول‌ای حاوی پی‌سی‌ام مناسب برای مدیریت حرارتی ماهواره  
بررسی عددی استفاده از پرده‌های توپر یا متخلخل برای بهبود انتقال حرارت در ریک