



Numerical investigation of the effect of the presence of fin in a phase-change material filled heat-sink on the melting and heat transfer

Jafar Jamaati^{1*}, Mohsen Soltani Sameleh²

¹ Assistant Professor, Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

² Graduated Student, Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

* 6714414971, Kermanshah, Iran, jjamaati@razi.ac.ir

Article info

Article history:

Received: 05 Dec 2024

Revised: 05 Jan 2025

Accepted: 15 Jan 2025

Available online: 23 Feb 2025

Keywords:

Heat transfer

Phase change material

Fin

Heat sink

<https://doi.org/10.22077/AEC.2025.8515.1027>

AEC.2025.8515.1027

Abstract

The melting and heat transfer process in a rectangular heat sink with a single fin filled with phase-change material was numerically investigated, and the effect of the position and geometric ratio of the fin on improving the heat transfer and temperature distribution uniformity inside the phase change material was studied. A 2D numerical solution of governing equations was obtained using ANSYS-FLUENT software. The fin positions on all four walls of the chamber were considered, and at least three locations on each wall were examined. The fin area was constant throughout the study, and three geometric ratios were assumed for the fin. The results of the numerical simulations showed that the presence of fins on the left and right walls always improved heat transfer. In addition, fins with a larger fineness ratio caused greater uniformity in the temperature of the phase-change material and simultaneously caused a greater reduction in the maximum temperature of the heat sink surface. In all cases studied, the greatest improvements were observed when the fin was located on the left wall. It was found that the presence of the fin significantly controls the combined heat transfer of free convection and conduction, and by choosing the appropriate location and geometric ratio for the fin, the overall heat transfer coefficient can be improved by approximately 75% compared with the case without fins.

بررسی عددی تاثیر حضور پره در هیت سینک حاوی ماده تغییر فاز دهنده بر فرآیند ذوب و انتقال حرارت

جعفر جماعتی^{1*}، محسن سلطانی سامله²

¹ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

² دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

* ۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱، کرمانشاه، ایران، jjamaati@razi.ac.ir

چکیده

در این مقاله فرآیند ذوب و انتقال حرارت درون یک هیت سینک مستطیلی دارای یک تک پره که از ماده تغییر فاز دهنده پر شده است به صورت عددی بررسی شد و تاثیر موقعیت و نسبت هندسی پره بر بهبود انتقال حرارت و توزیع دما درون ماده تغییر فاز دهنده مطالعه شد. حل عددی دوبعدی معادلات حاکم توسط نرم افزار آنسیس-فلوینت به دست آمد. موقعیت پره روی هر چهار دیواره محفظه در نظر گرفته شده است و حداقل سه محل استقرار روی هر دیواره مطالعه شده است. سطح پره در تمامی این مطالعه برابر با عددی ثابت می باشد و سه نسبت هندسی برای پره فرض شده است. نتایج شبیه سازی های عددی نشان داد که حضور پره روی دیواره سمت چپ و سمت راست همواره باعث بهبود انتقال حرارت می گردد. به علاوه پره با نسبت ظرافت بزرگتر باعث یکنواختی بیشتر در دمای ماده تغییر فاز دهنده شد و همزمان کاهش بیتشری را در دمای ماکزیمم مربوط به سطح هیت سینک ایجاد نمود. در همه حالات مورد بررسی، بیشترین بهبودها برای حالتی مشاهده شد که پره در دیواره سمت چپ مستقر باشد. مشخص شد که حضور پره به صورت جدی انتقال حرارت مرکب از جابجایی آزاد و رسانایی را کنترل می کند و با انتخاب محل و نسبت هندسی مناسب برای آن، می توان ضریب انتقال حرارت کلی را نسبت به وضعیت بدون پره تا حدود 75 درصد بهبود داد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۳/۰۹/۱۵

بازنگری: ۰۳/۱۰/۱۶

پذیرش: ۰۳/۱۰/۲۶

نشر برخط: ۰۳/۱۲/۰۵

کلمات کلیدی:

انتقال حرارت

ماده تغییر فاز دهنده

پره

چاه حرارتی

همانطور که گفته شده دلیل اصلی حضور پره‌ها، بهبود رسانایی معادل ماده تغییر فاز دهنده است. با توجه به این مطلب لازم است جنس پره مناسب مورد بررسی قرار گیرد. تیان و همکاران [۱۵] اثر جنس پره را بر زمان ذوب PCM بررسی کردند مشاهده شد که پره‌های فولادی تقریباً به اندازه پره‌های مسی موثر هستند به نحوی که در صورت استفاده از این پره‌ها، میزان کاهش زمان ذوب در مقایسه با مسالغ بدون پره به ترتیب برابر با 41.6 درصد و 37.2 درصد می‌باشد. حضور مناسب پره درون PCM منجر به یکنواختی بهتر دما درون آن می‌شود. ارشد و همکاران [۱۶] با انجام شبیه‌سازی عددی نشان دادند که هیت‌سینک‌های پره دار با هندسه مناسب می‌تواند ذوب یکنواخت در محفظه PCM ایجاد کند. این کار باعث کمتر شدن دمای سطح قطعه الکترونیکی می‌شود. ساهو و همکاران [۱۷] با شبیه‌سازی عددی گزارش دادند که پره‌های ارتوتروپیک عملکرد حرارتی بهتری را در کاهش دمای سطح قطعه الکترونیکی دارند. جشی و راثود [۱۸] یک مطالعه عددی را برای به دست آوردن بهترین اندازه و مکان پره در یک محفظه مستطیل شکل انجام دادند و با بررسی پیکربندی‌های متفاوت برای هندسه پره نشان دادند که می‌توان ضمن حفظ عملکرد حرارتی، از وزن پره کاست. لاکرویکس و بنمادا [۱۹] با شبیه‌سازی عددی فهمیدند که طول پره در مقایسه با تعداد پره، تأثیر بیشتری بر ذوب PCM دارد.

مطالعات قبلی برای سیستم‌های حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده نشان می‌دهد که رسانایی پایین مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند با استفاده از پره بهبود یابد و موجب تسریع برداشت حرارت از قطعه الکترونیکی توسط PCM گردد. در این مطالعات، اثر تعداد پره، زاویه پره، هندسه پره و چیدمان آنها مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش حاضر به بررسی اثر یک تک پره مستقیم در یک هیت‌سینک مستطیلی عمودی پر شده با ماده تغییر فاز دهنده می‌پردازد. در بین مطالعات قبلی، تأثیر حضور پره در دیواره‌های مختلف و محل بهینه آن مورد بررسی قرار نگرفته است بنابراین در این مطالعه حضور پره در تمامی موقعیت‌های دیواره‌های هیت‌سینک بررسی شده است و پس از انتخاب دیواره بهینه، تأثیر پارامترهای هندسی پره در نحوه ذوب PCM مطالعه شده است.

۲ - مساله مورد بررسی و معادلات حاکم

در این پژوهش انتقال حرارت از هیت‌سینک یک پردازنده الکترونیکی به محفظه حاوی PCM به صورت عددی بررسی شده است. مطابق با شکل (۱) محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده به ابعاد $W = 50 \text{ mm}$ و $L = 120 \text{ mm}$ است که روی یک دیواره آن (در اینجا دیواره سمت راست) پره قرار گرفته است. سمت چپ محفظه در تماس با منبع حرارتی از جنس مس به ضخامت 20 mm است و شار حرارتی یکنواخت q'' به آن وارد می‌شود. دیواره‌های بالا، پایین و سمت چپ از ورقه استیل با ضخامت 1.5 mm تشکیل شده اند.

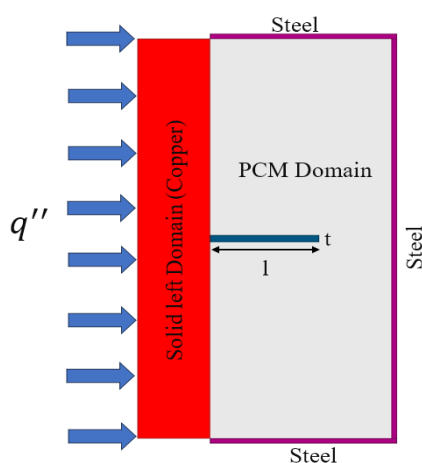


Fig. 1. Geometry and physical domain of the heatsink.

شکل ۱. هندسه و حوزه فیزیکی هیت‌سینک.

با توجه به پیشرفت الکترونیک و کوچک سازی قطعات الکترونیکی، انتقال حرارت و مسئله خنک سازی آن‌ها تبدیل به یک موضوع جدی در توسعه این دستگاه‌ها شده است. کوچک شدن قطعات و افزایش توان آنها منجر به گرم شدن بیش از حد قطعات الکترونیکی و به تبع آن بروز مشکلات فنی می‌گردد. شرما و همکاران [۱] نشان دادند که ضریب اطمینان عملیاتی تراشه‌های الکترونیکی به ازای هر 10 درجه سلسیوس افزایش دمای عملیاتی، 50 درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر میثال و همکاران [۲] نتیجه گرفتند که به ازای هر 1 درجه سلسیوس کاهش در دمای تراشه-های الکترونیکی، میزان خرابی آنها حدود 4 درصد کاهش می‌یابد. بنابراین مدیریت دمای کاری تراشه‌های الکترونیکی برای عملکرد مناسب آنها کاملاً ضروری است. بار حرارتی یک قطعه الکترونیکی در زمان اوج توان دستگاه می‌تواند توسط سیستم‌های ذخیره-سازی انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان جذب شود و سپس در زمان کم‌باری به تدریج به محیط داده شود. یک نکته بسیار جالب در این سیستم‌ها ثابت نگه داشتن دمای سیستم در طول فرآیند تغییر فاز سیستم ذخیره‌ساز است. اگر تراشه الکترونیکی برای مدت کوتاهی در اوج توان باشد، ماده تغییر فاز دهنده (PCM) می‌تواند با کنترل دما، از رسیدن دمای تراشه الکترونیکی به دمای بیشینه مخرب و مضر جلوگیری کند. بزرگترین نقطه ضعف مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی این است که غالباً رسانایی حرارتی آنها پایین است و مانع از انتقال گرمای مطلوب می‌شود. برای رفع این مشکل غالباً مواد تغییر فاز دهنده به هیت‌سینک^۱ (چاه حرارتی) یا پره-های مناسب تجهیز می‌شوند. شکل هندسی هیت‌سینک توسط العبیدی و همکاران [۳]، هوانگ و همکاران [۴] و آرچیبولد و همکاران [۵] بررسی شده است و مشخص شده است که هیت‌سینک با شکل مستطیل بهترین عملکرد حرارتی را در بین شکل‌های مستطیلی، مربعی و دایروی دارد.

برای تقویت رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، افزودن پره‌ها به هیت‌سینک به دلیل هزینه کم، نصب ساده و هدایت حرارتی بالا توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. ژانگ و همکاران [۶] با مطالعه تأثیر زاویه اتصال پره نشان دادند که انتخاب زاویه مناسب پره باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود و می‌تواند 14 درصد زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده را کاهش دهد. اولیوسکی و همکاران [۷] اثر ابعاد هندسی پره را بر سرعت ذوب یک هیت‌سینک مستطیلی بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در یک نسبت ثابت از ابعاد هندسی، افزایش طول پره منجر به کاهش زمان ذوب می‌شود. شن‌ژن و همکاران [۸] تأثیر حضور دو پره را درون ماده تغییر فاز دهنده مطالعه کردند و نشان دادند که استقرار پره کوتاه در بالا و پره بلند در پایین محفظه حاوی PCM می‌تواند به طور مثبت نرخ ذوب PCM را افزایش دهند به نحوی که زمان ذوب تا 45 درصد وضعیت بدون پره کاهش یابد. حسینی‌زاده و همکاران [۹] در یک مطالعه تجربی-عددی، اثرات پارامترهایی مانند توان حرارتی، تعداد، ارتفاع و ضخامت پره‌ها را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد و ضخامت پره‌ها باعث تأخیر زمان شروع ذوب می‌شود. مطالعات نشان داده شده است که چیدمان پره‌ها در نحوه و میزان انتقال حرارت اثر دارد. اشرف و همکاران [۱۰] ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک محفظه با سطوح پره‌دار را به صورت تجربی بررسی کردند و بهترین چیدمان پره‌ها را برای انتقال حرارت بهتر تعیین کردند. شریفی و همکاران [۱۱] ذوب ماده تغییر فاز دهنده با پره‌های داخلی در یک محفظه فلزی را به صورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد که با وجود پره‌های افقی، PCM در مراحل اولیه به سرعت ذوب می‌شود و با گذشت زمان سرعت ذوب کاهش می‌یابد. کامکاری و همکاران [۱۲] به روش تجربی ذوب PCM را در یک محفظه مستطیل شکل با پره‌های افقی انجام دادند. نتایج تجربی نشان داد که فراوانی تعداد پره‌ها زمان ذوب PCM را کاهش می‌دهد. در اغلب مطالعات شکل مرسوم پره‌ها با مقطع یکنواخت و مستطیلی است، اما مطالعاتی وجود دارد که هندسه‌های غیریکنواخت را برای پره در نظر گرفته اند. نخچی و همکاران [۱۳] توسط مطالعه عددی نشان دادند که پره‌های پلکانی در مقایسه با پره‌های افقی یکنواخت باعث تسریع فرآیند ذوب می‌شوند. لیو و همکاران [۱۴] مزایای پره‌های دارای باله را در مقایسه با پره مستطیلی هم وزن را مطالعه کردند و کاهش 39 درصدی در زمان ذوب را مشاهده کردند.

ابعاد هندسه انتخابی هماهنگ با هیت‌سینک پردازنده‌های core i9 شرکت اینتل هستند که توان حرارتی طراحی آنها از 35 W تا 125 W می‌تواند تغییر کند. بر این

1. Phase-Change-Material (PCM)
2 Heat Sink

اعمال شده است. معیار همگرایی برای معادلات سرعت و پیوستگی 10^{-4} و برای معادله انرژی 10^{-8} در نظر گرفته شده است.

۳-۲- استقلال از شبکه و گام زمانی و اعتبارسنجی

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، فرآیند ذوب در یک محفظه بدون پره به صورت عددی حل شد و میزان کسر مایع در طول زمان برای شبکه‌هایی با تعداد 4295، 8227، 17715 و 32164 گره به دست آمد. نتایج به دست آمده برای شبکه‌های بزرگ‌تر از 17715 گره تغییر محسوسی نمی‌کند و این تعداد گره برای ادامه محاسبات انتخاب شد. به صورت مشابه، استقلال از گام زمانی برای شبکه با 17715 گره، نتایج به دست آمده در گام زمانی حدود $\Delta t = 0.4$ s محقق شد. اعتبارسنجی مطالعه حاضر با کمک نتایج جی و همکاران [۱۶] انجام شده است و در شکل (۲) نشان داده شده است. طبق این نمودار اختلاف کسر حجمی مذاب به دست آمده از مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۱۶]، حداکثر 1 درصد اختلاف دارند.

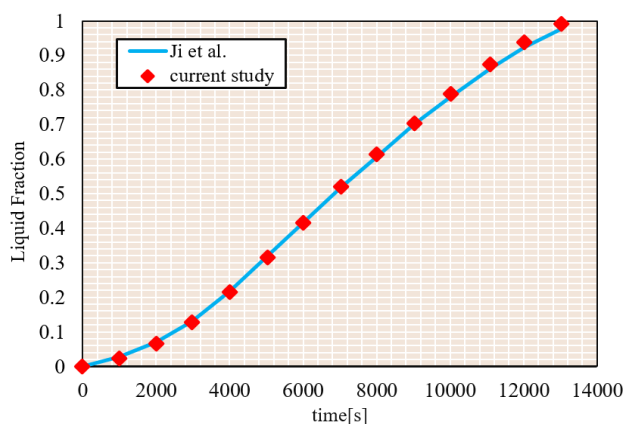


Fig. 1. Comparison of predicted liquid fraction of present study and those of Ji et al. [16].

شکل ۱. مقایسه کسر مایع پیش‌بینی شده از مطالعه حاضر با نتایج جی و همکاران [۱۶].

۳ - نتایج

برای بررسی اثر پره، سه هندسه برای پره در نظر گرفته شده است که در جدول (۱) نشان داده شده است. مساحت پره در همه حالات برابر با 1% از سطح مربوط به محفظه PCM است. لذا مقدار ماده PCM در همه حالات برابر است.

جدول ۱. پارامترهای هندسی پره‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها.

Table 1. The geometrical specifications of fin used in simulations.

Case	Length (mm)	Thickness (mm)	Area ((mm) ²)
1	48	1.25	60
2	30	2	60
3	15	4	60

حضور پره در هر چهار دیواره بررسی شده است. روی هر دیواره عمودی 5 موقعیت استقرار مطابق با جدول (۲) بررسی شده است. مقدار γ از صفحه بالایی محفظه سنجیده می‌شود.

جدول ۲. موقعیت‌های پره روی دیواره‌های عمودی.

Table 2. The positions of fin on the vertical walls.

Case	1	2	3	4	5
γH^{-1}	0.088	0.172	0.500	0.828	0.912

روی دیواره‌های افقی 3 موقعیت استقرار مطابق با جدول (۳) در نظر گرفته شده است. موقعیت x از دیواره سمت چپ سنجیده می‌شود.

مبنا توان حرارتی اعمالی به دیواره سمت چپ برابر با $65 W$ در نظر گرفته شد که شاری برابر با $q'' = 4515 Wm^{-2}$ ایجاد می‌کند. در تمام بررسی‌های این مقاله، سطح پره مقدار ثابتی است و برابر با 1% از سطح مقطع محفظه PCM در نظر گرفته شده است.

۱-۲- معادلات حاکم

برای حل عددی مساله فرض شده است که خواص ترموفیزیکی PCM شامل هدایت حرارتی، لزجت و ظرفیت گرمایی ویژه ثابت است. در فرآیند ذوب PCM، حرکت مایع به صورت یک جریان آرام، گذرا و تراکم‌ناپذیر فرض شده است. به علاوه تغییر حجم PCM و نیز حرکت فاز جامد PCM در طول فرآیند تغییر فاز نادیده گرفته می‌شود [۲۵]. برای مدل‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی از تقریب بوزینسک^۱ استفاده شده است. شبیه‌سازی فرآیند ذوب در این مساله با روش آنتالپی-تخلخل انجام شده است. معادلات حاکم بر شبیه‌سازی ذوب PCM شامل پیوستگی، مومنوم و انرژی به صورت زیر شرح داده شده است:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنوم:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla p + \rho \vec{g} + \vec{S}_u \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

در معادلات بالا، ρ چگالی، \vec{u} بردار سرعت، H آنتالپی، p فشار، μ لزجت دینامیکی، k رسانایی حرارتی و \vec{g} شتاب گرانشی است. عبارت \vec{S}_u در معادله مومنوم (معادله (۲)) به دلیل اثرات کاهش تخلخل در ناحیه خمیری است و مطابق با مرجع [۱۶] به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{S}_u = A_{mush} \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \epsilon} \vec{u} \quad (4)$$

که در آن $A_{mush} = 10^5$ ، ثابت ناحیه خمیری است. $\epsilon = 10^{-3}$ یک مقدار کوچک است که از صفر شدن مخرج کسر جلوگیری می‌کند. γ کسر مایع برای مشخص کردن تغییر فاز بین جامد و مایع می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

۲-۲- روش حل عددی

حل معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود در نرم‌افزار آنسیس-فلوینت نسخه 18 انجام شده است. ارتباط معادلات سرعت و فشار طبق الگوریتم سیمپل صورت گرفته است و رویکرد پرستو برای تصحیح معادلات فشار انتخاب شده است. ضرایب تخفیف برای فشار، سرعت، انرژی و کسر مایع به ترتیب 0.9 و 0.1، 0.2، 0.3 و 0.9

1. Boussinesq

برای بررسی اثر موقعیت پره نصب شده روی دیواره سمت چپ بر نحوه فرآیند ذوب، شکل (۴) رسم شده است. در این شکل کانتورهای کسر حجمی مذاب در زمان‌های 15، 30، 45 و 60 دقیقه برای پره نوع (۱) از جدول (۱) و در موقعیت $yH^{-1} = 0.5$ در دیواره سمت چپ، نمایش داده شده است.

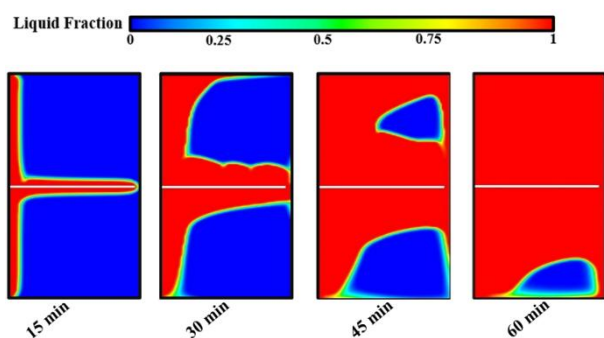


Fig. 4. Melt volume fraction contours for fin (1) on the left wall at position $yH^{-1} = 0.5$ at different times. شکل ۴. کانتورهای کسر حجمی مذاب برای پره نوع (۱) در دیواره سمت چپ در موقعیت $yH^{-1} = 0.5$ در زمان‌های مختلف.

کاملاً مشهود است که حضور پره، الگوی ذوب شدن را به طور جدی تغییر می‌دهد. باید توجه شود که در هنگام ذوب، مکانیزم رسانایی و جابجایی به صورت توام حرارت را منتقل می‌کنند. وجود پره باعث تقویت مکانیزم رسانایی و نفوذ سریع گرما به فواصل دور از سطح می‌شود. اما حضور فیزیکی آن در حوزه مذاب باعث ایجاد مانع برای مکانیزم جابجایی آزاد می‌شود. این آثار متضاد باعث می‌شود تا با یک مساله بهینه‌سازی برای موقعیت و اندازه طول پره مواجه باشیم.

در شکل (۵) تاثیر محل استقرار پره روی دیواره سمت چپ بررسی شده است. در اولین ردیف از بالا، میدان دما برای محفظه بدون پره در زمان‌های 15، 30، 45 و 60 دقیقه نشان داده شده است. در ردیف‌های بعدی محل استقرار پره از بالای دیواره به پایین دیواره جابجا شده است. موقعیت هندسی این مواضع در جدول (۲) آمده است. به صورت بصری مشاهده می‌شود که بهترین عملکرد پره نوع (۱) از جدول (۱) در ذوب PCM وقتی است که محل استقرار آن نزدیک به دیواره پایینی باشد (ردیف پنجم از شکل (۵) را ببینید). برای این وضعیت محل استقرار در ارتفاع $yH^{-1} = 0.172$ می‌باشد. به صورت مشابه با نتایج شکل (۵)، بررسی اثر پره در دیواره‌های سمت راست، دیواره بالا و دیواره پایین نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کیفی مربوط به میدان حرارت نشان داد که دیواره سمت چپ دارای مزیت بیشتری برای بهبود انتقال حرارت درون محفظه PCM می‌باشد. برای بررسی این مطلب به صورت کمی، نمودارهای کسر حجمی مایع در طول زمان به دست آمده است.

جدول ۳. موقعیت‌های پره روی دیواره‌های افقی.

Table 3. The positions of fin on the horizontal walls.

Case	1	2	3
xL^{-1}	0.2125	0.500	0.7875

خواص فیزیکی مربوط به مواد در جدول (۴) آمده است. داده‌های مربوط به PCM با نام تجاری RT42 از مرجع [۱۶] به عاریت گرفته شده است.

جدول ۴. خواص ترموفیزیکی مواد.

Table 4. Thermo-physical properties of materials.

Properties	PCM	Copper	Steel
Liquid density (kgm^{-3})	760	-	-
Solid density (kgm^{-3})	880	8978	8030
Specific heat (Jkg^{-1})	2000	381	502
Latent heat (kJkg^{-1})	165	-	-
Thermal conductivity ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0.2	387.6	16.27
Viscosity ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	0.0235	-	-
Melting Point ($^{\circ}\text{C}$)	42	-	-
solidification Point ($^{\circ}\text{C}$)	38	-	-
Thermal expansion coefficient (K^{-1})	0.0001	-	-

۱-۳- بررسی کیفی اثر موقعیت پره بر ذوب ماده تغییر فاز دهنده در هیئت‌سینک

در شکل (۳) کانتورهای (خطوط هم‌تراز) کسر حجمی مذاب برای زمان‌های مختلف برای هیئت‌سینک حاوی PCM که هیچ پره‌ای ندارد، در زمان‌های 15، 30، 45 و 60 دقیقه رسم شده است. توان گرمایی پردازنده از وجه سمت چپ هیئت‌سینک وارد می‌شود و با گذشت زمان باعث ذوب شدن PCM می‌گردد. مقدار دمای PCM در شروع برابر با 26.5°C است.

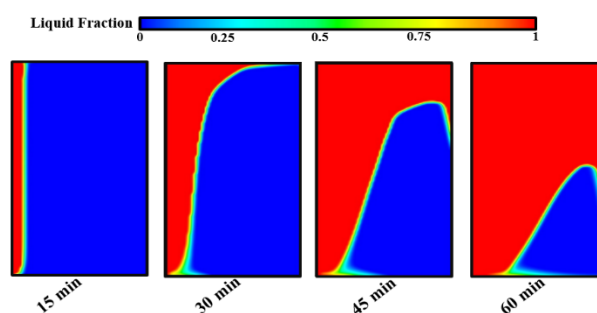


Fig. 3. Contours of melt volume fraction at various time.

شکل ۳. کانتور کسر حجمی مایع مذاب برای زمان‌های مختلف.

مشاهده می‌شود که پیشروی جبهه مذاب در راستای افقی به صورت غیریکنواخت است. با افزایش دمای PCM و ذوب شدن آن، به دلیل وجود گرادیان دما در بخش مذاب، جریان جابجایی آزاد شکل می‌گیرد و باعث حرکت مذاب در یک گردابه ساعت‌گرد در حوزه مذاب (ناحیه قرمز رنگ) می‌شود. وجود این گردابه علاوه بر افزایش انتقال حرارت، باعث می‌شود تا در قسمت‌های بالایی، سرعت پیشروی جبهه مذاب تقویت شود و از این رو جبهه مذاب غیریکنواخت پیش خواهد رفت. مطابق با این شکل در زمان 30 دقیقه جبهه مذاب در قسمت بالایی هیئت‌سینک به نیمه طول هیئت‌سینک رسیده است. در زمان‌های بعدی، نیمه بالایی هیئت‌سینک کاملاً در فاز مایع قرار دارد و بخش جامد محدود به حوزه مشخصی در قسمت پایین و مجاور دیواره سمت راست می‌باشد.

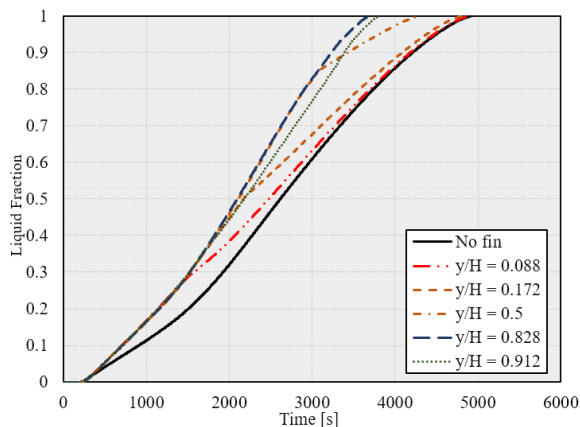


Fig. 6. Melt volume fraction diagrams for positions of fin (1) on the left wall.

شکل ۶. نمودارهای کسر حجمی مذاب برای موقعیت‌های پره نوع (۱) در دیواره سمت چپ.

برای دیواره سمت چپ، در همه زمان‌های شبیه‌سازی، حضور پره در هر موقعیتی که باشد، انتقال حرارت را نسبت به محفظه بدون پره بهبود می‌دهد. با توجه به این نمودار سه رژیم متفاوت در زمان‌های اولیه، میانی و انتهایی قابل تشخیص است. در زمان‌های ابتدایی تا حدود ۱۵۰۰ ثانیه، کسر حجمی مذاب مستقل از موقعیت پره روی دیواره است. در طی این زمان‌ها، به دلیل نازک بودن گستره مذاب، عملاً مکانیزم رسانایی غالب است و انتقال حرارت کاملاً در جهت افقی می‌باشد. برای این شرایط ارتفاع محل استقرار پره نقشی در مقاومت رسانایی معادل (که متشکل از PCM و پره است) ندارد. در زمان‌های میانی یعنی از حدود ۱۵۰۰ ثانیه تا ۳۵۰۰ ثانیه، با افزایش گستره مذاب، امکان جابجایی درون مایع ممکن می‌شود و انتقال حرارت مرکب از جابجایی آزاد و رسانایی است. در این حالت محل پره بر مکانیزم جابجایی آزاد اثر می‌گذارد و لذا میزان کسر حجمی مذاب متأثر از محل پره می‌شود. در زمان‌های بعد از ۳۵۰۰ ثانیه، بخش کمی از محفظه که مشخصاً دور از منبع حرارت است، در حالت جامد قرار دارد و لذا مکانیزم غالب در انتقال حرارت، به صورت جابجایی آزاد است. در رژیم انتقال حرارت مرکب، بهترین عملکرد مربوط به موقعیت $yH^{-1} = 0.5$ و پس از آن $yH^{-1} = 0.828$ است. در همین حال موقعیت‌های $yH^{-1} = 0.088$ و $yH^{-1} = 0.172$ کمترین بهبود را در انتقال حرارت دارند و منحنی کسر حجمی مذاب تقریباً شبیه با هیت‌سینک بدون پره است. در زمان‌های انتهایی که جابجایی آزاد مکانیزم غالب است، بهترین عملکرد مربوط به موقعیت $yH^{-1} = 0.828$ و پس از آن $yH^{-1} = 0.5$ است. به صورت کلی وجود پره در موضع $yH^{-1} = 0.828$ و به تبع آن تسریع انتقال حرارت باعث شده است که فرآیند ذوب کامل برای PCM در حدود ۳۶۰۰ ثانیه انجام شود. برای محفظه بدون پره این زمان حدود ۴۹۰۰ ثانیه است.

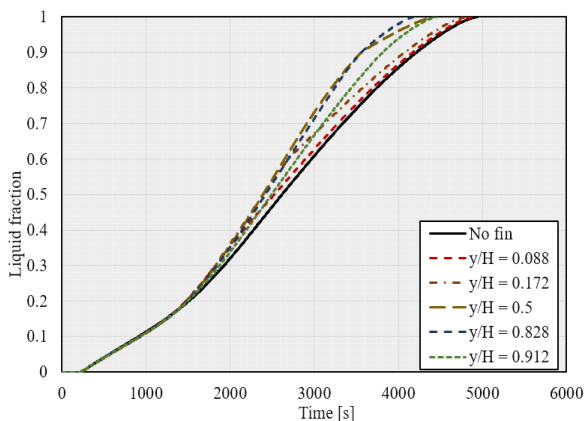


Fig. 7. Melt volume fraction diagrams for positions of fin (1) on the right wall.

شکل ۷. نمودارهای کسر حجمی مذاب برای موقعیت‌های پره نوع (۱) در دیواره سمت راست.

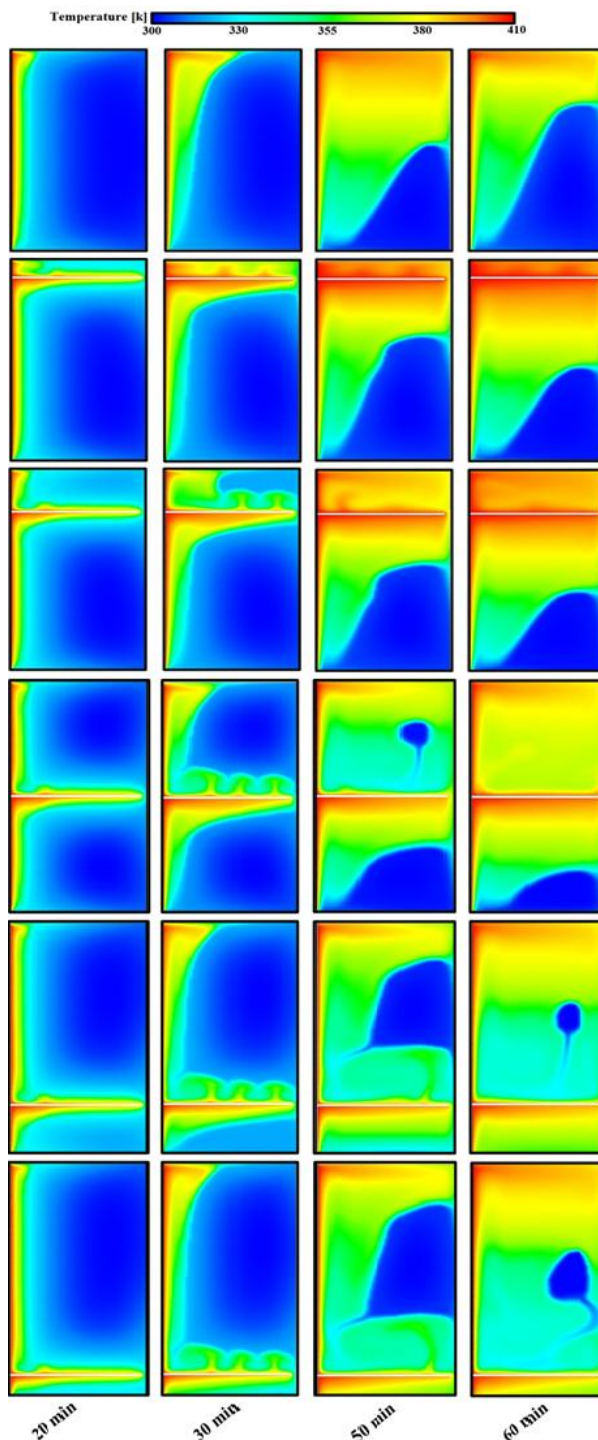


Fig. 5. Temperature contours at different times and for various positions of fin (1) on the left wall (the first row is the case without blade).

شکل ۵. کانتورهای دما در زمان‌های مختلف و برای موقعیت‌های مختلف پره نوع (۱) روی دیواره سمت چپ (ردیف اول وضعیت بدون پره است).

۲-۳- بررسی کمی اثر موقعیت پره بر کسر حجمی مذاب در طول زمان

در شکل (۶) مقادیر کسر حجمی مذاب درون محفظه در طول زمان محاسبه و برای محفظه بدون پره و محفظه دارای پره رسم شده است. مطابق با جدول (۲)، پنج موقعیت برای پره نوع (۱) در نظر گرفته شده است.

در محور عمودی شکل (۸)، پارامتر $\theta = (T_{max} - T_{min}) \times (q'')^{-1}$ می‌باشد. در زمان $t = 60 \text{ min}$ به $\theta = 0.009 \text{ Km}^2\text{W}^{-1}$ می‌رسد که با توجه به شار اعمالی معادل اختلاف دمای حدود 40°C بین داغ‌ترین و خنک‌ترین نقطه سطح قطعه است. با نصب پره درون محفظه PCM مقدار پارامتر θ در همه زمان‌ها کمتر از وضعیت بدون پره است. نکته جالب این است که در شرایطی که پره در موقعیت بهینه یعنی $yH^{-1} = 0.828$ قرار دارد، میزان غیریکنواختی ابتدا صعودی و سپس نزولی است. به این معنا که غیریکنواختی دما در ابتدا افزایش می‌یابد اما در ادامه روند کاهشی پیدا می‌کند. برای پره با موقعیت گفته شده و محل نصب روی دیواره سمت چپ، حداکثر پارامتر $\theta = 0.0055 \text{ Km}^2\text{W}^{-1}$ است. علت تغییر روند این است که در مراحل انتهایی مکانیزم انتقال حرارت جابجایی غالب می‌شود و با هم زدن مذاب باعث می‌شود دما سطح به یکنواختی بیشتری دست یابد.

۴-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت بی بعد

در شکل (۹) نمودار عدد ناسلت برای چند وضعیت از محفظه دارای پره در دیواره سمت چپ و نیز محفظه بدون پره نشان داده شده است. اختلاف دمای مرجع برای محاسبه عدد ناسلت به صورت اختلاف بین دما متوسط سطح و دمای متوسط PCM تعریف شده است. طول مشخصه برابر با عرض محفظه در نظر گرفته شده است.

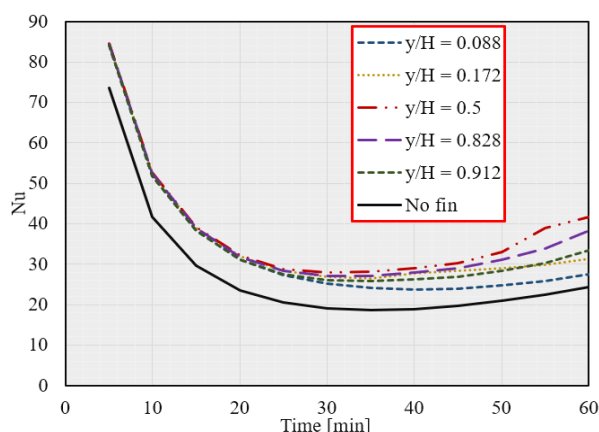


Fig. 9. Nusselt number over time for the chamber without fins and the chamber with fins installed on the left wall.

شکل ۹. عدد نوسلت در طول زمان برای محفظه بدون پره و محفظه دارای پره نصب شده روی دیواره چپ.

بیشترین مقدار عدد نوسلت در زمان‌های اولیه مشاهده می‌شود. در این دوره زمانی یک لایه بسیار نازک از PCM ذوب شده روی سطح دیواره و پره وجود دارد و مقاومت حرارتی در کمترین مقدار ممکن است. لذا ضریب انتقال حرارت با بیشترین مقدار خود حادث می‌شود. در ادامه با افزایش مقاومت حرارتی، مقدار ضریب انتقال حرارت کلی کاهش می‌یابد تا اینکه در زمان حدود ۴۰ دقیقه، به علت فعال شدن جدی جابجایی، مقدار ضریب کلی انتقال حرارت کمی بهبود می‌یابد. اثر مکان پرها می‌تواند در تقویت یا تضعیف جابجایی آزاد بسیار موثر باشد. شکل (۹) نشان می‌دهد که موقعیت پره مستقر در $yH^{-1} = 0.5$ روی دیواره سمت چپ، دارای بالاترین مقادیر عدد نوسلت در طول فرآیند ذوب هستند. برای این حالت در زمان‌های ابتدایی مقدار عدد نوسلت حدود ۱۵ درصد و در زمان‌های انتهایی حدود ۷۵ درصد بیشتر از نوسلت مربوط به وضعیت بدون پره است. البته انتظار می‌رفت که برای وضعیت $yH^{-1} = 0.828$ به عدد نوسلت ماکزیم برسیم. به نظر می‌رسد ثابت فرض شدن طول مشخصه برای همه حالات باعث این انحراف از واقعیت شده است. به صورت مشابه عدد نوسلت برای حالتی که پره در دیواره سمت راست مستقر باشد، مطالعه شد. در این حالت مقدار عدد نوسلت در وضعیت $yH^{-1} = 0.5$ با اختلاف نسبتاً جزئی از بقیه حالات بیشتر بود.

به صورت مشابه شکل (۷) مقادیر کسر حجمی مذاب را در طول زمان محاسبه برای زمانی که پره در دیواره سمت چپ است، نشان می‌دهد. مباحث مطرح شده در مورد سه رژیم انتقال حرارت رسانایی، مرکب و جابجایی در اینجا هم دیده می‌شود. اما در اینجا به علت اینکه پایه پره با منبع حرارت اتصال ندارد، اثر پره به صورت مشهود ضعیف‌تر از نتایج شکل (۶) است که در آن پره روی دیواره سمت چپ و منبع حرارت مستقر شده است. برای پره‌های مستقر روی دیواره سمت راست، زمان ذوب کامل حدود ۳۲۰۰ ثانیه است.

۳-۳- بررسی دمای بیشینه سطح قطعه

با توجه به این که هیت‌سینک توسط پردازنده در معرض شار حرارتی ثابت قرار دارد، بررسی بیشینه دمای مجاور با پردازنده به دلیل تشکیل نقاط با دمای بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار است. هر قدر بیشینه دمای این دیواره کمتر باشد، احتمال تشکیل نقاط داغ روی سطح پردازنده کمتر می‌شود. جدول (۵)، بیشینه دمای دیواره چسبیده به پردازنده را در زمان ۳۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهد.

جدول ۵. مقادیر دمای حداکثر روی سطح پردازنده بعد از ۳۶۰۰ ثانیه.

Table 5. Maximum temperature of CPU surface after 3600 seconds.

Location of fin	Right-side wall	Left-side wall
$yH^{-1} = 0.088$	399.1	396.0
$yH^{-1} = 0.172$	396.2	392.5
$yH^{-1} = 0.500$	390.4	382.8
$yH^{-1} = 0.828$	391.3	381.0
$yH^{-1} = 0.912$	396.4	384.2
No fin	400.5	400.5

مطابق با این جدول، حضور پره روی دیواره سمت راست می‌تواند حدود 19°C دمای سطح پردازنده را بکاهد. برای پره مستقر در دیواره سمت راست، این اثر کمتر است و در حدود 10°C می‌باشد. کاهش دمای پردازنده نقش جدی در افزایش طول عمر آن دارد و لذا وجود پره می‌تواند به نحو موثری باعث افزایش عمر قطعه الکترونیکی گردد.

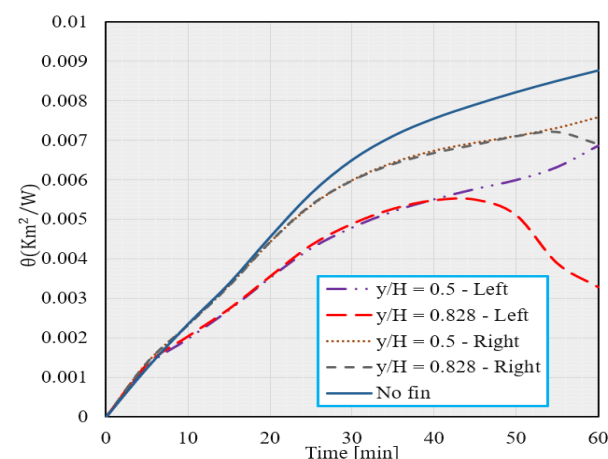


Fig. 8. The degree of temperature non-uniformity on the surface of the electronic component according to the position of the fin.

شکل ۸. میزان غیریکنواختی دما روی سطح قطعه الکترونیکی بر حسب موقعیت پره.

یک شاخص مهم دیگر که می‌تواند در عملکرد پردازنده موثر باشد، نحوه توزیع دما روی سطح آن است. در یک توان حرارتی مشخص، هر چقدر که توزیع دما یکنواخت‌تر باشد، دمای حداکثر سطح قطعه الکترونیکی کمتر خواهد بود و لذا شرایط کارکرد آن بهتر خواهد بود. برای بررسی میزان یکنواختی دمای سطح پردازنده (که در اینجا در سطح سمت چپ مستقر شده است)، میزان اختلاف دمای حداکثر و دمای حداقل روی این سطح به عنوان یک معیار از غیریکنواختی دما محاسبه شده است و در شکل (۸) نشان داده شده است.

۳-۵- بررسی زمان لازم برای ذوب کامل PCM

شکل (۱۰) نمودار زمان لازم برای ذوب کل PCM را در هیت سینک حاوی پره در دیواره سمت چپ نشان می‌دهد. سه نوع هندسه مطابق با جدول (۱) برای پره در نظر گرفته شده است و تاثیر هر کدام از آنها در موقعیت‌های مختلف روی دیواره سمت چپ بررسی شده است. با توجه به اینکه شرط مرزی برای قطعه به صورت شار ثابت اعمال شده است، زمان ذوب طولانی‌تر به معنای دریافت بیشتر حرارت است. این مطلب در وهله اول مطلوب است چون برداشت بار حرارتی بیشتر را نشان می‌دهد. اما از آنجا که در همه وضعها حجم PCM یکسان است، حرارت اضافه به صورت محسوس در PCM جذب شده است و یعنی دمای PCM و قطعه الکترونیکی بالاتر خواهد بود که اساساً با فلسفه استفاده از PCM مغایرت دارد. بنابراین طولانی شدن زمان ذوب را به عنوان یک ویژگی نامطلوب تلقی می‌کنیم.

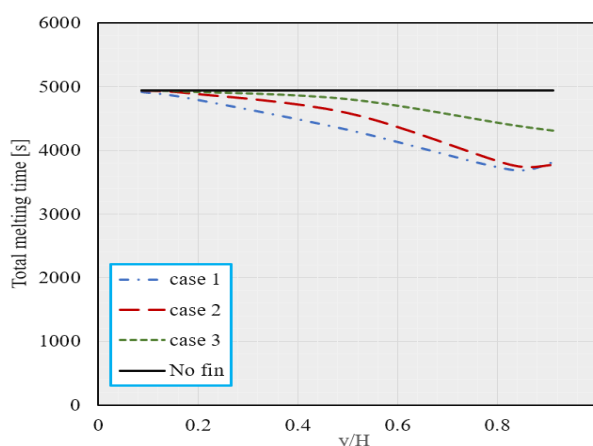


Fig. 10. Time required for complete melting of PCM in the heat sink for all 3 fin types on the left wall compared to the heat sink without fins.

شکل ۱۰. زمان لازم برای ذوب کامل PCM در هیت سینک برای هر 3 نوع پره در دیواره سمت چپ در مقایسه با هیت سینک بدون پره.

با مشاهده شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که دفع حرارت پره نوع (۳) در مقایسه با پره نوع (۱) عملکرد خوبی در زمان ذوب ندارد ولی پره نوع (۲) عملکرد خیلی بهتری نسبت به پره نوع (۳) دارد و باعث می‌شود که PCM در زمان کم‌تری نسبت به پره نوع (۳) در هیت سینک ذوب شود. بنابراین می‌توان گفت که هر چه طول بیشتر و ضخامت کم‌تر باشد، تأثیرگذاری بهتری از پره در دیواره سمت چپ مشاهده می‌شود. حضور پره در دیواره سمت چپ باعث می‌شود 1250 s زمان ذوب ماده تغییر فزاینده نسبت به هیت سینک بدون پره کاهش یابد.

۴ - نتیجه گیری

با مطالعه عددی ذوب PCM درون یک محفظه حاوی پره مشخص شد که حضور پره با دخالت در مکانیزم رسانایی و جابجایی آزاد بر عملکرد دمایی هیت سینک تأثیرگذار است. مشاهده شد که حضور پره در دیواره‌های سمت چپ و راست همواره با آثار مثبت در انتقال حرارت همراه است. اما وقتی پره در دیواره‌های بالا یا پایین مستقر می‌شود، می‌تواند اثر منفی در عملکرد هیت سینک داشته باشد. به علاوه با انتخاب مناسب محل پره می‌توان فرآیند انتقال حرارت از قطعه الکترونیکی به محفظه PCM را تسریع نمود و این کار مستقیماً باعث کاهش دمای سطح قطعه الکترونیکی و توزیع دمایی یکنواخت‌تر روی آن می‌گردد.

۵ - فهرست علائم

A	سطح (m ²)
C _p	ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ⁻¹)
\vec{g}	شتاب گرانشی (ms ⁻²)
H	ارتفاع محفظه (m)
k	رسانایی حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
L	طول محفظه (m)
L _h	گرمای نهان (Jkg ⁻¹)
Nu	ضریب انتقال حرارت بی‌بعد
p	فشار (Pa)
q''	شار حرارت (Wm ⁻²)
S	جمله چشمه مومنوم (Nm ⁻³)
t	زمان (s)
T	دما (K)
\vec{u}	بردار سرعت (ms ⁻¹)
W	عرض محفظه (m)
x	مولفه مختصات افقی (m)
y	مولفه مختصات عمودی (m)

حروف یونانی

β	ضریب انبساط حجمی (K ⁻¹)
ε	مقدار بسیار کوچک
θ	شاخص بی‌بعد غیر یکنواختی دما
μ	لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
ρ	چگالی (kgm ⁻³)

زیرنویس‌ها

l	مابع
m	ذوب
s	جامد
u	سرعت

۶ - مراجع

- [1] C. Sharma, S. Zimmermann, M. Tiwari, B. Michel, D. Poulikakos, "Optimal thermal operation of liquid-cooled electronic chips", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, No57-8, pp. 1957-1969, 2012.
- [2] P. Mithal, "Design of experimental based evaluation of thermal performance of a flichip electronic assembly", ASME EEP Proceedings, Vol. 18, pp. 109-115, 1996.
- [3] A.A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, A.T. Mohammad, "Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 61, No. 1, pp. 684-695, 2013.
- [4] M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, No. 12, pp. 2715-2733, 2004.
- [5] A.R. Archibold, J. Gonzalez-Aguilar, M.M. Rahman, D. Yogi Goswami, M. Romero, E.K. Stefanakos, "The melting process of storage materials with relatively high phase change temperatures in partially filled spherical shells", Appl. Energy, Vol. 116, pp. 243-252, 2014.
- [6] Y. Zhang, B. Sun, X. Zheng, P.K. Singh, H. Ayed, A. Mouldi, A. Mohamed, S.Mehrez, "Investigation on effect of connection angle of "L" Shaped fin on charging and discharging process of PCM in Vertical enclosure", Case studies in Thermal Engineering, Vol. 33, pp. 101908, 2022.
- [7] R. De Cesaro Oliveski, F. Becker, L.A.O. Rocha, C. Biserni, G.E.S. Eberhardt, "Design of fin structures for phase

- change material (PCM) melting process in rectangular cavities*", Journal of Energy Storage, Vol. 35, pp. 102337, 2021.
- [8] C. Ji, Z. Qin, S. Dubey, F.H. Choo, F. Duan, "Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a rectangular enclosure induced by natural convection", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 127, pp. 255–265, 2018.
- [9] S.F. Hosseinizadeh, F.L. Tan, S.M. Moosania, "Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 3827-3838, 2011.
- [10] M.J. Ashraf, H.M. Ali, H. Usman, A. Arshad, "Experimental passive electronics cooling: Parametric investigation of pin-fin geometries and efficient phase change materials", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 115, pp. 251-263, 2017.
- [11] N. Sharifi, T.L. Bergman, A. Faghri, "Enhancement of PCM melting in enclosures with horizontally-finned internal surfaces", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, No. 19, pp. 4182–4192, 2011.
- [12] B. Kamkari, H. Shokouhmand, "Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 839–851, 2014.
- [13] M.E. Nakhchi, J.A. Esfahani, "Improving the melting performance of PCM thermal energy storage with novel stepped fins", Journal of Energy Storage, Vol. 30, 101424, 2020.
- [14] S. Liu, H. Bai, Q. Xu, P. Jiang, S. Khorasani, A. Mohamed, "Investigations on effect of arrangement of fins on melting performance of vertical PCM enclosure (3D simulation using FVM methods)", Alexandria Engineering Journal, Vol. 61, pp. 12139-12150, 2022.
- [15] L.-L. Tian, X. Liu, S. Chen, Z.-G. Shen, "Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure", Applied Thermal Engineering, Vol. 167, 114764, 2020.
- [16] A. Arshad, M. Jabbal, P.T. Sardari, M.A. Bashir, H. Faraji, Y. Yan, "Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling", Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 18, pp. 100520, 2020.
- [17] S.K. Sahoo, P. Rath, M.K. Das, "Numerical study of phase change material based orthotropic heat sink for thermal management of electronics components", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 103, pp. 855–867, 2016.
- [18] V. Joshi, M.K. Rathod, "Constructal enhancement of thermal transport in latent heat storage systems assisted with fins", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 145, pp. 105984, 2019.
- [19] M. Lacroix, M. Benmadda, "Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 31, pp. 71–86, 1997.