

مروری جامع بر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در خنک سازی بردهای الکترونیکی

فائزه رستمیان^{*} دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، f.rostamian@ce.iut.ac.ir

نسرین اعتصامی^{*} دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، netesami@iut.ac.ir

مجید حقگو استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، m.haghgoo@isrc.ac.ir

چکیده

دستگاه‌های الکترونیکی با کاربردهای متنوع و وسیعی که این روزها پیدا کرده‌اند، برای داشتن عمر طولانی‌تر و عملکرد ایمن‌تر، باید زیر دمای بحرانی کار کنند. بنابراین لازم است گرمای مازاد تولید شده در آنها به طور مناسبی از این دستگاه‌ها خارج شود. اخیراً، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به عنوان یکی از روش‌های موثر برای حذف گرما از وسایل الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته است. اما علیرغم ظرفیت بالای ذخیره سازی انرژی در PCMها، رسانایی گرمایی پایین آن‌ها به عنوان یک عامل محدود کننده برای استفاده از این مواد می‌باشد. بنابراین، تحقیقات فعلی بر بهبود عملکرد گرمایی PCM با استفاده از تقویت کننده رسانایی گرمایی (TCE) متمرکز شده است. پره‌های فلزی، نانوذرات مخلوط شده با PCM و فوم‌های فلزی، به عنوان تقویت کننده رسانایی گرمایی استفاده می‌شوند در این مقاله، مطالعات مختلفی در مورد روش‌های مورد استفاده در بهبود عملکرد PCM برای خنک سازی اجزای الکترونیکی تحت بار گرمایی ثابت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، برد الکترونیکی، چاه گرمایی، پره، نانوذره، فوم فلزی.

A comprehensive review on the use of phase change materials in cooling of electronic board

F. Rostamian
N. Etesami
M. Haghgoo

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Professor, Iranian Space Research center, Tehran, Iran

Abstract

Electronic devices with different and wide applications must operate under critical temperature for long life and safe operation. Therefore, excess heat must be properly removed from these devices. Recently, the use of phase change materials (PCM) has been considered as one of the effective methods for removing heat from electronic devices. Despite the high energy storage capacity of PCM, the low thermal conductivity of them is a limiting factor for the use of these materials. Therefore, current research has focused on improving the thermal performance of PCM using thermal conductivity enhancer (TCE). Metallic fins, nanoparticles mixed with PCM, and metallic foams are used as thermal conductivity enhancer. In the three methods mentioned as thermal conductivity enhancers, it is observed that the presence of metal fins leads to more uniformity of the base temperature of the heat sink and decreasing the base temperature. The use of nanoparticles provides appropriate and acceptable performance for temperature management of heat sink. Also, metal foams offer good performance due to their higher surface to volume ratio, better heat conductivity and lower weight. In this paper, various studies about enhance PCM performance for cooling electronic components under constant heat load are investigated and compared.

Keywords: Phase Changer Materials, Electronic Board, Heat Sink, Fin, Nanoparticle, Metal Foam.

استفاده از روش‌های غیر فعال برای انتقال گرما در قطعات الکترونیکی از جمله بردهای الکترونیکی به دلیل عدم نیاز به صرف توان اضافی برای به حرکت در آوردن سیال عامل، سبک‌تر بودن قطعات مورد استفاده و کم هزینه‌تر بودن نسبت به روش‌های فعال، بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. چاه گرمایی معمولاً با تماس مستقیم برای خارج کردن گرما از تراشه استفاده می‌شود. متداولترین طراحی چاه‌های گرمایی، یک قطعه فلزی است که دارای پره‌های زیادی است. پره‌ها منجر به انتقال گرمای موثر ایجاد شده در قطعه به محیط اطراف می‌شوند. این انتقال گرما از طریق همرفت آزاد، همرفت اجباری، خنک کننده مایع و یا ترکیبی از عوامل مذکور حاصل می‌شود. عموماً در انتقال گرمای اجباری، عملکرد چاه گرمایی با افزایش ضریب انتقال کلی گرما بهبود می‌یابد.

در سال‌های اخیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یکی از

۱- مقدمه

امروزه، دنیای فیزیکی با به‌کارگیری قطعات الکترونیکی مانند رایانه، کنترل‌های دیجیتال، تلفن‌های هوشمند، حسگرهای حساس، بردهای الکترونیکی، دستگاه‌هایی با دقت بالا و ... به دنیای دیجیتال تغییر کرده است. یکی از مهمترین موضوعات، مربوط به کنترل دما، خنک سازی و مدیریت گرمایی این قطعات الکترونیکی می‌باشد. زیرا اجزای الکترونیکی در حین کار، گرما تولید می‌کنند و برای محافظت از تجهیزات و افزایش طول عمر آن‌ها، دمای آن‌ها باید در حد مجاز کنترل شود. روش‌های مختلفی برای کاهش و دفع گرما از اجزای الکترونیکی وجود دارد که شامل روش‌های فعال (فن ، میکروکانال‌ها ، خنک‌کننده‌های پاششی) و روش‌های غیر فعال (چاه گرمایی ، پخش کننده‌های گرمایی ، مواد تغییر فاز دهنده) می‌باشد. در این میان

^{*} نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: netesami@iut.ac.ir

روش‌های غیر فعال برای مدیریت گرمایی قطعات الکترونیکی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است. PCMها می‌توانند حجم زیادی از انرژی گرمایی را در طول تغییرات فاز خود ذخیره و آزاد کنند و در نتیجه با تنظیم دمای مطلوب در سیستم مورد نظر، بهترین کارکرد را برای آن فراهم کنند. برخی از مهمترین کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده عبارتند از: استفاده از انرژی خورشیدی [۱]، گلخانه‌ها [۲]، تجهیزات الکترونیک [۳]، منسوجات [۴]، صنایع ساختمانی [۵]، تهویه مطبوع [۶]، بسته بندی مواد غذایی [۷] و حمل و نقل مواد دارویی [۸].

PCMها بر اساس ساختار شیمیایی به مواد آلی، معدنی و یوتکتیک طبقه بندی می‌شوند. PCMهای آلی می‌توانند در دو زیر گروه اصلی قرار گیرند: پارافین‌ها و اسیدهای چرب. محدوده ذوب و آنالتپی پارافین‌ها به ترتیب در حدود $۴۶-۶۸$ °C و $۱۴۰-۲۵۰$ kJ/kg می‌باشد و این محدوده برای اسیدهای چرب نیز در حدود $۷۰-۵۰$ °C و $۲۰۰-۶۰$ است [۹-۱۱]. مقالات بسیاری وجود دارند که جزئیات بیشتری در رابطه با انواع مختلف PCM، خصوصیات گرمایی/ فیزیکی آن، کپسوله کردن PCM، مشکلات مربوط به تغییر فاز، مسائل مربوط به سیستم و کاربرد آن را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲-۱۵]. در این میان PCMهای آلی به دلیل خواص مطلوب مانند رفتار ذوب/انجماد سازگار، فوق سرمایش کم، تغییر کمتر فشار بخار در دمای عملیاتی، عدم سمیت و دسترسی آسان، ترجیح داده می‌شوند [۱۰]. شایعترین مشکل PCMهای آلی رسانایی گرمایی کم می‌باشد که باعث می‌شود فرآیندهای گرمایش و سرمایش در طول ذوب و جامد سازی PCM کند شود. برای اینکه PCMها برای کاربردهای خنک کننده مناسب باشند، لازم است مواد با رسانایی گرمایی بالا به PCM اضافه شود تا به انتقال گرما کمک کند. این مواد به عنوان افزایش دهنده رسانایی گرمایی (TCE) شناخته می‌شوند. کاربرد TCE در افزایش عملکرد PCM در ذخیره سازی انرژی گرمایی توسط سامی و همکاران [۱۶] و خدادادی و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اگر PCM در ترکیب با چاه گرمایی، برای خنک‌سازی قطعه الکترونیکی استفاده شود، می‌تواند در مدیریت دمایی آن نقش به سزایی داشته باشد. در این زمینه مقالات بسیاری به چاپ رسیده‌اند که در جدول ۱ تعدادی از آن‌ها آورده شده اند.

تاکنون محققان سه روش برای بهبود خنک سازی با استفاده از روش غیرفعال و بهره گیری از PCM اتخاذ کرده اند. این روش‌ها شامل (الف) استفاده از چاه گرمایی مجهز به پره‌های فلزی (ب) استفاده از نانوذرات (ج) استفاده از ماتریس فوم فلزی است. با توجه به اینکه تا کنون مقایسه جامعی بین تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه نشده است، لذا هدف از این بررسی ارائه و مقایسه مجموعه مطالعات انجام شده در مورد خنک سازی قطعات الکترونیکی با استفاده از PCMها در سه روش ذکر شده و با تاکید بر روش استفاده از چاه گرمایی مبتنی بر PCM-TCE است.

۲- استفاده از چاه گرمایی مجهز به پره حاوی PCM

و تاثیر عوامل مختلف بر آن

رسانایی گرمایی بعضی از PCMها بسیار پائین است که با کند کردن جذب گرما و دفع آن، اثر چاه گرمایی را کاهش می‌دهد. بنابراین

به منظور افزایش انتقال گرما، پره‌ها به چاه گرمایی افزوده می‌شوند که باعث افزایش رسانایی گرمایی آن می‌شوند. این مفهوم برای اولین بار توسط ابات پیشنهاد شد [۲۵] و اولین بار توسط هنزه و همکاران [۲۶] پیاده سازی شد. در ادامه اثر پارامترهای مختلف از جمله میزان توان اعمال شده، تعداد پره‌ها، تغییرات هندسی و کسر حجمی PCM بر رفتار چاه گرمایی بررسی می‌شود.

۲-۱- تاثیر میزان توان اعمال شده بر عملکرد چاه

گرمایی

همزمان با شروع کار سیستم‌های الکترونیکی، گرما در تراشه ایجاد می‌شود. تمرکز اصلی این بررسی در این است که چگونه گرمایی ایجاد شده از تراشه به محیط اطراف منتقل شود. امروزه هرچه قطعات الکترونیکی کوچک و کوچکتر می‌شوند، چگالی توان بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین تلاش برای حذف این توان ایجاد شده یک چالش آشکار است. بیشتر دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل توانی از ۱ تا ۱۰ وات و ریزپردازنده‌ها در حدود ۲۵ تا ۶۰ وات را تولید می‌کنند که این توان منجر به گرمایی بسیار زیادی می‌شود و اگر به درستی مدیریت نشود، ممکن است تراشه آسیب ببیند. در این راستا بررسی‌هایی صورت گرفته است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

کانداسامی و همکاران [۲۷] برای خنک سازی قطعات الکترونیکی، چاه گرمایی حاوی PCM را روی قطعه الکترونیکی قرار دادند و به طور آزمایشگاهی و عددی نتایج خود را بررسی کردند. در این بررسی محدوده توان ورودی از ۲ تا ۶ وات بود. واکس پارافینی با نقطه ذوب متوسط ۵۵ درجه سلسیوس به عنوان PCM انتخاب شد. نتایج نشان داد، هنگامی که توان ورودی بیشتر از ۲ وات باشد گنجاندن PCM در حفره های چاه گرمایی باعث افزایش عملکرد خنک کنندگی در مقایسه با موارد بدون PCM می‌شود. اما برای سطح توان پایین تر، حضور PCM به دلیل نقطه ذوب بالا، موثر واقع نشد. همچنین افزایش مصرف انرژی باعث افزایش نرخ ذوب و نیز عملکرد گرمایی چاه گرمایی حاوی PCM شد. نایاک و همکاران [۲۸] اثر میزان توان اعمالی را (۴-۶ وات) با توجه به میزان زمان ذوب در داخل PCM، مورد مطالعه قرار دادند. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش توان، مدت زمان ذوب کاهش و دمای تراشه افزایش یافته است. ماری و همکارانش [۲۹] در بررسی تجربی و عددی خود از چاه گرمایی حاوی سه نوع PCM (ایکوزان، دوکوزان و تتراکوزان به ترتیب با دمای ذوب ۳۶، ۴۴، ۵۲ درجه سلسیوس) استفاده کردند و اثر تغییرات توان اعمالی را بر روی رفتار چاه گرمایی حاوی PCM بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در توان ۶ وات، تتراکوزان که دمای ذوب بالاتری نسبت به بقیه داشته، در حدود ۶۸٪ عملکرد بهتری در کاهش دمای سیستم از خود نشان داده است. اما با افزایش توان اعمالی تا ۱۰ وات، تمامی PCMها عملکرد یکسانی از خود نشان دادند. بنابراین تغییرات توان ورودی بر روی رفتار PCMها بسیار تاثیر گذار خواهد بود که بسته به نوع سیستم مورد استفاده و توان ورودی آن، باید انتخاب درستی از PCM صورت گیرد.

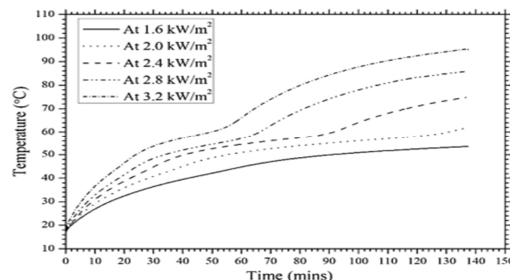
جدول ۱- مطالعات انجام شده برای خنک سازی قطعات الکترونیکی با استفاده از چاه گرمایی به همراه PCM (بدون استفاده از پره)		
ملاحظات	PCM	نویسنده
یک بررسی تجربی بر روی تغییرات دمایی چاه گرمایی در دو حالت (الف) حاوی PCM در کسر حجمی‌های متفاوت، (ب) حاوی PCM به همراه فوم فلزی در توان‌های متفاوت صورت گرفت و یک حالت بهینه بر اساس نتایج بدست آمده برای کاهش دمای چاه گرمایی گزارش شد.	واکس پارافین نقطه ذوب: ۵۸-۶۲ °C آنتالپی: 194 kJ/kg	کوتاری و همکاران [۱۸]
توجه اصلی مطالعه به تأثیر جابجایی طبیعی در ذوب PCM در یک محفظه بلند بود. رابطه ای برای انتقال گرما و کسر مذاب نیز ارائه شد.	تری کنتان (Tricentane) نقطه ذوب: 65 °C آنتالپی: 163 kJ/kg	پال و همکاران [12]
تحقیقات بر روی یک چاه گرمایی مربعی با ابعاد ۱۱۰×۱۱۰×۲۶ mm انجام شد. در هر آزمایش چاه گرمایی با درصد حجمی‌های مختلفی از PCM پر شد و تأثیر آن بر روی رفتار دمایی سیستم بررسی شد. بیشترین کاهش دمایی زمانی اتفاق افتاد که چاه گرمایی کاملاً با PCM پر شده بود.	هگزادکانول (hexadecanol) نقطه ذوب: ۵۸/۴ °C آنتالپی: 188 kJ/kg	لئونگ و همکاران [۱۹]
در این مطالعه تأثیر شار گرما بر دما مورد بررسی قرار گرفت. PCM درون محفظه فلزی نازکی کپسوله شده بود و رفتار آن در چهار توان الکتریکی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. در دو حالت بدون PCM و دیگری با PCM برای سطح توان ۴، ۳، ۲ و ۰/۸ وات، دمای منبع گرم، دمای محفظه، حداکثر و حداقل دما مقایسه و ترسیم شدند.	ان ایکوزان (n-Eicosane) نقطه ذوب: ۳۶ °C آنتالپی: 244 kJ/kg	تان و همکاران [۲۰]
نتایج عددی برای سطوح مختلف توان (۴-۲ وات) نشان داد، استفاده از PCM به همراه چاه گرمایی آلومینیومی باعث می‌شود قطعه‌های الکترونیکی دمای عملیاتی پایدارتری داشته باشند. همچنین جهت گیری اثر ناچیزی بر عملکرد سیستم داشت.	ان ایکوزان نقطه ذوب: ۳۶ °C آنتالپی: 244 kJ/kg	یانگ و همکاران [۲۱]
مدل تحلیلی برای شبیه سازی دقیق ذخیره سازی گرما و رهاسازی آن در یک کامپوزیت PCM نیمه بی‌نهایت ارائه شد.	کامپوزیت پلیمری نقطه ذوب: ۴۵ °C آنتالپی: 200 kJ/kg	ورتر و همکاران [۲۲]
گالیم به دلیل وجود گرمایی نهان زیادش در حین ذوب و انجماد، عملکرد بسیار مناسبی را برای چاه گرمایی فراهم کرد. همچنین به علت رسانایی گرمایی بالای گالیم انتقال گرما به میزان قابل توجهی افزایش یافت. اما وقتی که دما به پایین تر از نقطه ذوب آن کاهش می‌یافت، گالیم جامد نمی‌شد. برای رفع این مشکل ۱۰٪ وزنی پارافین و ۱٪ وزنی SiO ₂ اضافه شد.	گالیم نقطه ذوب: ۳۰ °C آنتالپی: 80 kJ/kg	جی و همکاران [۲۳]
در این پژوهش استفاده از کامپوزیت PCM و بررسی رفتار دمایی قطعه الکترونیکی (مدار صفحه‌ای چاپی (PCB)) در نزدیکی دمای بحرانی مورد بررسی قرار گرفت.	زایلیتول (Xylitol) نقطه ذوب: ۹۳ °C آنتالپی: 263 kJ/kg	ماکسا و همکاران [۲۴]

بالایی کار می‌کنند. در این بررسی مشخص شد که برای سطح توان بالاتر، سرعت ذوب افزایش می‌یابد و فرایند ذوب به دمای بالاتری انتقال پیدا می‌کند. ببی و همکاران [۳۴] به طور تجربی نتایج مشابهی را برای توان ۳-۷ وات پیدا کردند. آنها در مشاهدات خود دریافتند که با افزایش سطح توان، مدت

زمان ذوب کاهش می‌یابد اما صرف نظر از میزان توان، ذوب در دمای یکسانی اتفاق می‌افتد که در کار حسینی زاده و همکاران [۳۳] اتفاق نیفتاده است. این تضاد بین دو نویسنده به دلیل انتخاب سطح توان‌های مختلف بوجود آمده است. علی محمدی و همکاران [۳۵] یک مطالعه تجربی برای بررسی اثرات استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان خنک کننده برای یک قطعه الکترونیکی انجام دادند. PCM مورد استفاده در این مطالعه، $Mn(NO_3)_2$ ، یک نوع نمک هیدرات غیر آلی بود. رفتار گرمایی پایا و گذرای قطعه الکترونیکی تحت شرایط عملیاتی مختلف با استفاده از شار گرمایی متفاوت ($1000-4000 \text{ W/m}^2$) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور PCM می‌تواند دما پایای

فوک و همکاران [۳۰] و ستوه و همکاران [۳۱] در آزمایشات خود از نیکوزان به عنوان PCM استفاده کردند. برای سطح توان ۳، ۴ و ۵ وات مشخص شد که پس از مدت زمان معین، دمای چاه گرمایی برای توان ۴ وات در مقایسه با ۵ وات کمتر بوده و فرایند ذوب در توان ۵ وات سریع‌تر انجام شده است و برای توان ۳ وات به دلیل انتخاب PCM با نقطه ذوب بالاتر، دما به نقطه ذوب نرسید. نتیجه مشابهی در این زمینه توسط وو و همکاران [۳۲] نیز مشاهده شد. حسینی زاده و همکاران [۳۳] دما را برای سه سطح مختلف توان (۲۵، ۳۵ و ۴۵ وات) به طور تجربی و عددی (برای مدل دوبعدی و سه بعدی) بررسی کردند. علت انتخاب این توان زیاد، خارج کردن گرما از ریزپردازنده توسط چاه گرمایی بود. زیرا همانطور که قبلاً اشاره شد، ریزپردازنده‌ها در توان‌های

قطعه الکترونیکی را به مقدار زیادی در مقایسه با چاه گرمایی بدون PCM کاهش دهد. پاسخ دما-زمان برای آزمایش‌ها در شار گرمایی 3000 W/m^2 نشان داد که پس از گذشت ۲۸ دقیقه از گرم شدن، برای سیستم شامل PCM دمای تراشه تقریباً ۳۰ درجه سلسیوس خنک‌تر از سیستم بدون PCM است. رستمان و همکاران [۳] در مطالعه تجربی خود از یک چاه گرمایی آلومینیومی با ۹ پره صفحه‌ای استفاده کردند و آن را با استئاریک اسید (کسر حجمی ۱۱٪) به عنوان PCM پر نمودند. سپس گرمادهی به سیستم را در توان ۴ و ۵ وات انجام دادند. در توان ۴ وات پس از گذشت حدود ۸۰۰ ثانیه از شروع آزمایش، ذوب PCM شروع شد و فرایند ذوب تا ۲۰۰۰ ثانیه ادامه پیدا کرد. به عبارتی، حدود ۲۰ دقیقه منطقه دما ثابت ایجاد شد که این پدیده به میزان قابل توجهی زمان عملیاتی برد الکترونیکی را بالا برد. به طور مشابه برای توان ۵ وات پس از گذشت حدود ۴۰۰ ثانیه از شروع آزمایش، ذوب PCM شروع شد و فرایند ذوب تا ۱۱۰۰ ثانیه ادامه پیدا کرد. در این حالت، با توجه به توان بالاتر اعمال شده به PCM، سرعت ذوب افزایش یافت و ضمن کوتاه‌تر شدن بازه ذوب، دما نیز با شیب ملایمی تغییر پیدا کرد. نتایج آنها نشان داد، هنگامی که توان بیشتری به سیستم اعمال شود، فرآیند ذوب زودتر آغاز شده، PCM با سرعت بیشتری ذوب شده و محدوده دما ثابت کمتر می‌شود. ارشد و همکاران [۳۶] تأثیر شارهای گرمایی مختلف را بر روی رفتار PCM بررسی کردند. طیف وسیعی از شار گرما از $1/6 \text{ kW/m}^2$ تا $3/2 \text{ kW/m}^2$ در نظر گرفته شد. شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش توان ورودی، فاز گرمایش نهان کوتاه‌تر می‌شود. همچنین هیچ تغییر فازی در شار گرمای $1/6 \text{ kW/m}^2$ حتی بعد از ۱۴۰ دقیقه رخ نداد اما می‌توان تغییر فاز سریع را برای شار گرمای $3/2 \text{ kW/m}^2$ مشاهده کرد که بعد از ۲۸ دقیقه رخ می‌دهد.



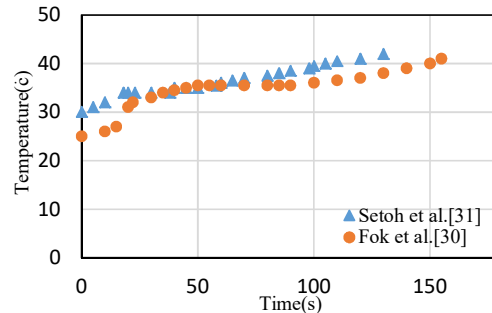
شکل ۱ - تأثیر توان‌های اعمالی مختلف بر دمای PCM [۳۶]

۲-۲- تأثیر تعداد پره‌ها بر عملکرد چاه گرمایی

همانطور که تحقیقات نشان می‌دهد، PCM‌ها از گرمای نهان بالایی برخوردار هستند اما عموماً رسانایی گرمایی آن‌ها کم است، بنابراین می‌توان PCM‌ها را به عنوان یک ذخیره ساز گرمایی خوب اما هادی گرمایی ضعیف تصور کرد. با افزودن پره‌هایی که از رسانایی گرمایی بالاتری نسبت به PCM برخوردار هستند، می‌توان از مزیت وجود گرمای نهان و رسانایی گرمایی، به طور همزمان استفاده کرد. در این راستا تحقیقات متعددی هم به صورت آزمایشی و هم به صورت

عددی انجام شد تا تأثیر تعداد پره‌ها را بر عملکرد چاه گرمایی بررسی کند.

فوک و همکاران [۳۰] و ستوه و همکاران [۳۱] به ترتیب با در نظر گرفتن تعداد ۶ و ۳ پره صفحه‌ای، عملکرد یک قطعه الکترونیکی را مورد بررسی قرار دادند. در هر دو بررسی ابعاد چاه گرمایی، نوع PCM استفاده شده و توان به کار گرفته شده یکسان و فقط تعداد پره‌ها متفاوت بود. به منظور مقایسه نتایج این دو بررسی، شکل ۲ ترسیم گردید. همانطور که در شکل مشخص است، داده‌های مربوط به کار فوک و همکاران [۳۰] نشان می‌دهد که به دلیل افزایش تعداد پره‌ها، سرعت انتقال گرما افزایش یافته است زیرا پره‌های بیشتر، می‌توانند گرما را به صورت بهتری در PCM توزیع کنند و باعث شده که دمای پایه تا ۴ درجه سلسیوس کاهش پیدا کند. علاوه بر آن طول محدوده ذوب با تغییر تعداد پره‌ها به علت تفاوت در سرعت انتقال گرما، تغییر پیدا کرده است. یک مطالعه عددی توسط کلیاسی و همکاران [۳۷] به منظور یافتن تعداد بهینه پره‌ها صورت گرفت. در این بررسی ۹۰۰ آرایش مختلف از چاه گرمایی در ضخامت‌های مختلفی از پره (۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر) و در دو شار گرمایی مختلف (5000 W/m^2 و 10000 W/m^2) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تعداد بهینه پره‌ها با افزایش ضخامت پره، کاهش می‌یابد. بیبی و همکاران [۳۸] به طور آزمایشی عملکرد چاه گرمایی را با استفاده از پره‌های سوزنی شکل با تعداد متغیر ۳۳، ۷۲ و ۱۲۰ و برای کسر حجمی مختلفی از PCM (۰/۳، ۰/۶ و ۱) مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که چاه گرمایی با ۷۲ پره بهترین عملکرد گرمایی را در تمام سطوح توان (۵-۸ وات) در مقایسه با ۳۳ و ۱۲۰ پره ارائه می‌دهد. زیرا در ۳۶ عدد پره، انتقال رسانایی گرمایی برای توان‌های متفاوت مناسب نبوده در حالی که برای ۱۲۰ پره، انتقال گرما با تعداد بیشتری از پره‌ها کنترل شده است. در این زمینه کار مشابهی توسط نیز توسط جایا کریشنا [۳۹] و محمود و همکاران [۴۰] انجام شد. موسوی و همکارانش [۴۱] به صورت عددی تأثیر افزایش تعداد پره را بر رفتار دمایی چاه گرمایی بررسی نمودند. در این پژوهش از ۲۷ پره به عنوان PCM تجاری استفاده کردند. آنها تعداد ۵ تا ۱۳ عدد پره را به چاه گرمایی اضافه کردند و رفتار دمایی سیستم را ثبت کردند. در این مطالعه، تعداد بهینه پره، پنج عدد گزارش شد. زیرا با افزایش تعداد پره به بیشتر از ۵ عدد، حجم چاه گرمایی کمتر می‌شد و PCM کمتری درون محفظه قرار می‌گرفت. لذا تأثیر گرمای نهان PCM بر کاهش دمای چاه گرمایی کمتر بود. در بررسی عددی که توسط سانه و همکارش [۴۲] صورت گرفت، از یک چاه گرمایی با تعداد ۲، ۳ و ۴ پره استفاده نمودند و تأثیرات تعداد پره را بر روی سرعت ذوب PCM، توزیع دما و عدد ناسلت بررسی کردند. مشخص شد که با افزایش تعداد پره‌ها توزیع دما یکنواخت‌تر و سرعت ذوب و عدد ناسلت هر دو افزایش می‌یابد.



شکل ۲ - رفتار دمایی قطعه الکترونیکی با تغییر تعداد پره های چاه گرمایی

۳-۲- تاثیر پارامترهای هندسی پره بر عملکرد چاه گرمایی

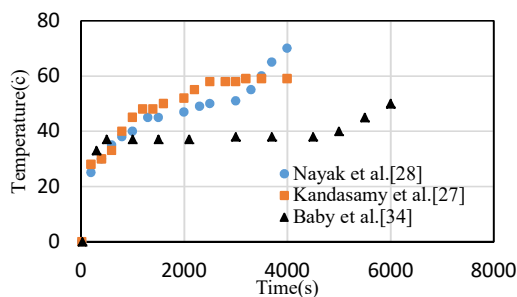
افزودن پره‌های فلزی به ساختار چاه گرمایی به عنوان TCE، سبب می‌شود، عوامل دیگری مانند شکل، ضخامت و ارتفاع پره بر عملکرد چاه گرمایی موثر شود. بنابراین، در ادامه به بررسی این عوامل پرداخته می‌شود.

شکل پره- تقی‌لو و همکاران [۴۳] در بررسی عددی خود از چاه گرمایی آلومینیومی حاوی PCM با ۶ پره صفحه‌ای، ۲۸ پره سوزنی و ۷۶ پره سوزنی استفاده کردند. در این مطالعه، رفتار دمایی چاه گرمایی در طول زمان ۰ تا ۷۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. دمای چاه گرمایی با پره صفحه‌ای در طول این بازه زمانی نوسان‌های زیادی از خود نشان داد، در صورتی که این رفتار نوسانی در پره‌های سوزنی دیده نشد. علاوه بر آن عملکرد پره‌های سوزنی در کنترل دمای سیستم و کاهش دمای آن بسیار بهتر از پره‌های صفحه‌ای بود. همچنین چاه گرمایی با ۷۶ پره سوزنی نسبت به ۲۸ پره سوزنی به میزان ۰.۳۶°C کاهش دمای بیشتری از خود نشان داد. همتی و همکاران [۴۴] در بررسی تجربی خود برای مدیریت گرمایی یک منبع تغذیه از دو نوع چاه گرمایی با پره‌های صفحه‌ای و سوزنی استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که حداکثر کاهش دمای ۴/۱۰ و ۶/۱۸ درجه سلسیوس به‌ترتیب در چاه گرمایی با پره‌های صفحه‌ای و سوزنی رخ داده است. در مطالعه‌ای که توسط محمودعلی و همکاران [۴۵] صورت گرفت، عملکرد سه نوع پره سوزنی با شکل‌های دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی بر چاه گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی از آن ایکوزان به‌عنوان PCM استفاده شد و تغییرات عدد استفان (St) با زمان برای این سه نوع پره مورد توجه قرار گرفت. دمای بحرانی، ۴۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد و مشاهده شد که بالاترین زمان عملیاتی (۱۲۰ دقیقه) برای پره‌های مثلثی بوده و پس از آن پره‌های مستطیلی و دایره‌ای بوده‌اند. با افزایش عدد استفان، زمان عملیاتی برای هر سه نوع پره کاهش یافت.

ضخامت پره- حسینی زاده و همکاران [۳۳] اثر ضخامت پره را بر دمای پایه چاه گرمایی با ثابت نگه داشتن تعداد پره‌ها و اندازه چاه گرمایی مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که با افزایش ضخامت پره از ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر، دمای پایه چاه گرمایی ۰.۸٪ کاهش می‌یابد. اما هنگامی که ضخامت پره به ۶ میلی‌متر افزایش یافت، کاهش بیشتری در دمای پایه مشاهده نشد. آنها نتیجه گرفتند که وقتی

ضخامت پره از ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر افزایش یافته، ظرفیت انتشار گرما در پره‌ها به دلیل در دسترس بودن سطح بیشتر افزایش یافته در حالی که ظرفیت گرمای نهان PCM به دلیل کاهش کسر حجمی کاهش یافته است. از آنجا که افزایش ظرفیت انتشار گرمای پره‌ها بیشتر از کاهش ظرفیت گرمای نهان PCM است، دمای پایه کاهش می‌یابد. با این حال با افزایش بیشتر ضخامت پره به ۶ میلی‌متر، افزایش در ظرفیت انتشار ممکن است تقریباً برابر با کاهش در ظرفیت گرمای نهان باشد که باعث می‌شود بر تغییر دمای پایه تأثیر نگذارد. از این رو مشخص است که افزایش بیشتر ضخامت پره باعث افزایش دمای پایه می‌شود. یک مطالعه عددی توسط ارشد و همکاران [۴۶] برای بررسی اثر ضخامت پره بر روی یک چاه گرمایی که با ایکوزان به‌عنوان PCM پر شده بود، صورت گرفت. کسر حجمی PCM در تمامی آزمایشات ثابت و به میزان ۰.۹٪ بود. بررسی‌ها در دو ضخامت مختلف ۲ و ۳ میلی‌متر از پره‌ها صورت گرفت. مشخص شد که با افزایش توان اعمالی از ۴ وات به ۶ وات، زمان ذوب PCM به میزان ۰.۷٪ برای پره با ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۲ میلی‌متر افزایش یافته است. شاهرخ و همکارانش [۴۷] در مطالعه تجربی خود از یک چاه گرمایی آلومینیومی حاوی PCM (ایکوزان) با پره‌های سوزنی گرد برای بررسی تاثیر ضخامت پره بر رفتار دمایی سیستم استفاده کردند. محدوده توان اعمالی ۵ تا ۷ وات و در چهار کسر حجمی متفاوت از PCM بود. در این مطالعه سه ضخامت مختلف ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ میلی‌متری از پره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمامی کسر حجمی‌ها و توان‌ها، چاه گرمایی با پره ۰.۳ میلی‌متری بهترین عملکرد را در ایجاد دمای یکنواخت‌تر در سامانه داشته است و رسانایی گرمایی بالاتر و کاهش بیشتری در دمای پایه ایجاد کرده است.

ارتفاع پره- علاوه بر تعداد پره‌ها و ضخامت آن، ارتفاع پره نیز ممکن است نقش مهمی در کاهش دمای پایه چاه گرمایی داشته باشد. حسینی‌زاده و همکاران [۳۳] و پاکروح و همکاران [۴۸] در مطالعات تجربی خود متوجه شدند که با افزایش ارتفاع پره، عملکرد چاه گرمایی افزایش می‌یابد. زیرا سطح انتقال گرما با افزایش ارتفاع پره افزایش می‌یابد. برای ارتفاع کوچکتری از پره، گرما از پایه به پره‌ها منتقل می‌شود. سپس پره‌ها گرما را تنها به بخش کوچکی از PCM منتقل می‌کنند. از آنجا که رسانایی گرمایی PCM کم است، از انتقال گرمای بیشتر به سمت مناطق فوقانی PCM جلوگیری می‌شود که باعث گرم شدن موضعی در پره‌ها و پایه می‌شود و در نهایت منجر به افزایش دمای پایه می‌شود. در ادامه حسینی‌زاده و همکاران [۳۳] گزارش کردند که پره‌های بلندتر عملکرد بهتری نسبت به پره‌های ضخیم‌تر با وجود داشتن حجم مشابه، داشته‌اند. انتقال گرما توسط پره‌های بلندتر یکنواخت‌تر از پره‌های ضخیم‌تر است زیرا مقدار بیشتری از PCM در تماس با پره‌های بلندتر قرار دارد. آن‌ها دریافتند که با افزایش ارتفاع پره، PCM سریع‌تر به دمای ذوب خود می‌رسد و زودتر شروع به ذوب می‌کند. همچنین نشان داده شد که با افزایش ارتفاع پره، دوره ذوب کاهش می‌یابد. پاکروح و همکاران [۴۸] مطالعات خود را بر روی پره‌های طولانی‌تر متمرکز کردند و دریافتند که رشد دما در آن، آهسته‌تر از پره‌های کوتاه است و بنابراین میانگین دمای پایه چاه گرمای کمتر شده بود. علاوه بر آن، دوره ذوب سیستم که در آن دمای پایه تقریباً ثابت باقی می‌ماند، افزایش یافته بود. لوین و همکاران [۴۹] یک بررسی عددی برای تعیین



شکل ۳- عملکرد چاه گرمایی با تغییر مقدار PCM

۴- چاه گرمایی حاوی PCM به همراه نانوذرات

اگرچه چاه گرمایی با پره‌های داخلی رسانایی گرمایی را بهبود می‌بخشد اما وجود پره‌ها وزن سیستم خنک کننده را افزایش می‌دهد و حجم چاه گرمایی را کاهش می‌دهد، بنابراین PCM کمتری در درون چاه گرمایی قرار می‌گیرد. به منظور برطرف کردن این مشکلات در هنگام استفاده از پره‌ها، محققان روش‌های جایگزینی برای افزایش رسانایی گرمایی PCM ارائه داده‌اند. آن‌ها دریافتند که اگر نانوذرات بسیار رسانا به عنوان TCE اضافه شوند، حجم کمی از این نانوذرات باعث می‌شود که چاه گرمایی عملکرد بسیار مناسبی برای خنک کردن قطعه‌های الکترونیکی داشته باشد. در بخش زیر تحقیقات انجام شده در مورد استفاده از نانوذرات معلق در PCM برای افزایش عملکرد چاه گرمایی، بدون افزایش قابل توجه در وزن یا اندازه ارائه شده است.

در بررسی تجربی که توسط سیواپراگسام و همکاران [۵۶] بر روی چاه گرمایی با پره‌های صفحه‌ای صورت گرفت، سه کسر حجمی ۱، ۳ و ۵ درصد از نانوذرات سیلیکا با واکنس پارافینی به عنوان PCM مخلوط شد و با حالت بدون PCM مقایسه گردید. مشخص شد که در کسر حجمی ۳٪ نسبت به ۱٪ عملکرد چاه گرمایی برای خنک سازی بسیار افزایش پیدا می‌کند و در این کسر حجمی، نانوذرات چاه گرمایی را زیر دمای بحرانی کنترل می‌کنند. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش حجم نانوذرات باعث افزایش رسانایی گرمایی کامپوزیت PCM تقویت شده با نانوذرات (NEPCM) می‌شود که منجر به افزایش سرعت انتقال گرما می‌گردد. زارما و همکارانش [۵۷] در مطالعه عددی خود از یک چاه گرمایی حاوی PCM به همراه نانوذرات استفاده کردند. آنها سه نوع نانوذره مختلف را (SiO_2 و CuO ، Al_2O_3) در دو کسر وزنی ۱٪ و ۵٪ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نانوذره Al_2O_3 در کسر وزنی ۵٪ نسبت به دو نانوذره دیگر بهتر عمل کرده و باعث افزایش راندمان سیستم به میزان ۸٪ شده است. همچنین توزیع دمای یکنواخت‌تری ایجاد کرده و دمای سیستم را تا 12°C کاهش داده است. فن و همکاران [۵۸] تاثیر تغییرات توان ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ وات را بر روی ماده تغییر فاز دهنده به همراه نانو پرکننده‌های کربن با نسبت بالا بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در توان ۴۰ وات، زمان رسیدن به دمای ۸۰ درجه سلسیوس توسط PCM خالص، ۳۶۰۰ ثانیه بود، در حالی که برای ۰/۳ درصد وزنی از NEPCM، ۱۸۹۰ ثانیه و برای ۱ درصد وزنی از NEPCM، ۱۴۰۰ ثانیه بوده است. در توان ۸۰ وات نتایج ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ ثانیه بدست آمد. افزایش بیشتر توان به ۱۲۰ وات باعث شد که زمان بدست آمده در کلیه موارد به ۱۲۰ ثانیه برسد که نشان می‌دهد در سطح توان بالاتر، اثر اضافه کردن نانوذرات ناچیز خواهد بود.

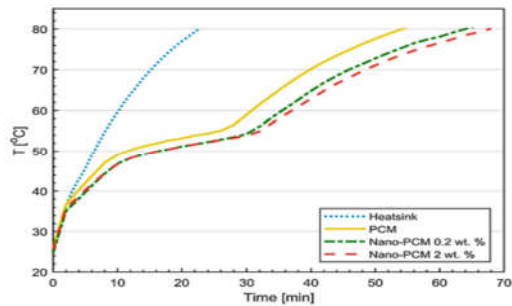
حالت بهینه چاه گرمایی انجام دادند. در این مطالعه دمای بحرانی ۶۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. آن‌ها بازده را به عنوان درصد جرمی از PCM که درون چاه گرمایی ذوب می‌شود، تعریف کردند. در این زمینه دریافتند که پارامترهای بهینه شامل، تعداد پره‌ها در طول واحد ۰/۲، طول پره ۲۰۰ میلی‌متر، ارتفاع پره ۲۰۰ میلی‌متر، عرض پره ۱۱۵ میلی‌متر و ۵۰ درصد PCM است. با استفاده از این پارامترها، دریافتند که چاه گرمایی ۳۰ دقیقه زمان می‌برد تا به دمای ۶۰ درجه سلسیوس برسد. همچنین دریافتند که درصد بهینه PCM به ارتفاع پره‌ها بستگی دارد. بنابراین آن‌ها ارتفاع پره‌ها را به نصف و یک چهارم کاهش دادند و درصد‌های مختلفی از PCM را استفاده کردند. سپس مشاهده کردند که اگرچه بازده افزایش یافته اما زمان رسیدن به دمای بحرانی بسیار پایین‌تر از مورد بهینه است.

۲-۴- تاثیر کسر حجمی PCM بر عملکرد چاه گرمایی

کسر حجمی PCM در چاه گرمایی در واقع معرف آنست که چه کسری از فضای خالی چاه گرمایی، توسط PCM پر شده است. وانگ و همکاران [۵۰] پروفایل دمایی را برای PCM با کسرهای حجمی ۳۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ بررسی کردند. مشاهده کردند که بدون حضور PCM، دمای پایه به شدت بالا می‌رود اما وقتی PCM حضور دارد، در افزایش دما تاخیر وجود دارد. این تاخیر در زمان پاسخگویی به دلیل وجود ظرفیت گرمایی بالا در PCM جامد نسبت به هوا در مقایسه با عدم وجود PCM است. با افزایش کسر حجمی PCM، ظرفیت گرمایی PCM افزایش یافته که باعث تاخیر بیشتر در زمان پاسخگویی می‌شود. در حین ذوب PCM، به دلیل نقطه ذوب ثابت PCM، دمای محلی می‌تواند برای مدت معینی ثابت نگه داشته شود، که این بستگی به حجم PCM در حفره‌های چاه گرمایی دارد. برای حجم PCM بزرگتر، مدت دمای ثابت طولانی‌تر می‌شود [۵۱-۵۴]. بیبی و همکاران [۳۸] رفتار دوره سرمایش PCM را با استفاده از کسر حجمی‌های مختلف (۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹) مشاهده کردند و متوجه شدند که با افزایش کسر حجمی PCM، زمان لازم برای دوره سرمایش افزایش یافته است. لوین و همکاران [۴۹] و هو و همکاران [۵۵] یک مطالعه دقیق برای یافتن مقدار بهینه کسر حجمی PCM انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار بهینه کسر حجمی PCM به تعداد پره‌ها، ضخامت پره‌ها و اندازه دامنه بستگی دارد. به منظور بررسی دقیق‌تر، یک نمودار مقایسه‌ای در میان یافته‌های نایاک و همکاران [۲۸]، کنداسامی و همکاران [۲۷] و بیبی و همکاران [۳۴] رسم شد (شکل ۳). در هر سه پژوهش از پره‌های صفحه‌ای استفاده شده و محدوده کار، با توان ۴ وات بوده است. با توجه به شکل مشخص است که تاریخچه دمایی بدست آمده توسط بالاجی و همکاران پایین‌تر از دو مورد دیگر بوده است، زیرا حجم بیشتری از PCM به دلیل بزرگتر بودن چاه گرمایی استفاده شده است. همچنین مقایسه نتایج نایاک و همکاران [۲۸] با کنداسامی و همکاران [۲۷] نشان می‌دهد که عملکرد نایاک و همکاران [۲۸] به دلیل استفاده از مقدار بیشتر PCM، بهتر از کنداسامی و همکاران [۲۷] بوده است.

برای جلوگیری از مشکلات ذکر شده، محققان استفاده از فوم فلزی را مورد بررسی قرار دادند که باعث تقویت رسانایی گرمایی و کاهش وزن سیستم خنک کننده می‌شود. کوتاری و همکارانش [۶۶] در بررسی خود رفتار دمایی فوم فلزی حاوی PCM را نسبت به چاه گرمایی حاوی PCM مقایسه کردند. مشخص شد که فوم فلزی حاوی PCM عملکرد بهتری در سیستم داشته و منجر به کاهش دمای بیشتری شده است. همچنین در توان‌های بالاتر نیز (2 و ۲/۷ kW/m²) عملکرد فوم فلزی به همراه PCM به علت ذوب کامل PCM بهتر بوده است و نسبت به چاه گرمایی حاوی PCM در زمان طولانی‌تری به دمای بحرانی رسیده است. لافدی و همکاران [۶۷] یک مطالعه پارامتری بر روی میزان تاثیر تخلخل، تراکم منافذ و اندازه منافذ در عملکرد فوم فلزی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در هنگام کاهش تخلخل از ۹۷٪ به ۹۰٪ مقاومت گرمایی فوم فلزی حاوی PCM به عنوان یک نوع چاه گرمایی کاهش یافته اما کاهش تخلخل از ۹۰٪ به ۸۸٪ تفاوت چندانی در رفتار سیستم ایجاد نکرده است. این امر به دلیل کاهش حرکت سیال در فضای محدود متخلخل فوم رخ داده است. از طرف دیگر، برای یک میزان تخلخل ثابت در فوم، تغییر در اندازه منافذ، تغییر قابل توجهی در مقاومت فوم ایجاد نمود. تغییر اندازه منافذ (از ۵ به ۴۰ PPI^۱ بیش از ۷/۵٪ تغییر در عملکرد فوم را نشان داد که تنها با تغییر تخلخل از ۹۷٪ به ۸۸٪ می‌توان همان نتیجه را گرفت. این بدان معناست که با استفاده از فوم با اندازه منافذ بزرگ، حدود ۱۱٪ از وزن ماده فوم ذخیره می‌شود. علی [۶۸] تحقیقات خود را بر روی یک فوم فلزی حاوی PCM تجاری RT۳۵HC متمرکز کرد. او در بررسی خود از دونوع فوم فلزی با جنس مس و نیکل با درصد تخلخل بالا (۹۷٪) استفاده کرد تا سطح انتقال گرما را افزایش دهد. نتایج تجربی نشان داد که در محدوده توان اعمالی ۸ تا ۲۴ وات، فوم فلزی مسی بهتر از فوم فلزی نیکلی عمل کرده است و کاهش دمای بیشتری به میزان ۲۸٪ در سیستم ایجاد کرده است. کیو و همکاران [۶۹] در بررسی تجربی خود از پارافین به عنوان PCM استفاده نمودند و مشاهده کردند که می‌توان با تخلخل کوچکتر و تراکم منافذ پایین‌تر، به دمای کمتری در فوم دست یافت. همچنین متوجه شدند که دمای سطح به تغییرات تخلخل در مقایسه با تغییرات تراکم منافذ، حساس‌تر بود. بیبی و همکارش [۷۰] به طور تجربی تاثیر جهت‌گیری را در ساختار فوم حاوی PCM مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که جهت‌گیری تأثیر چندانی بر عملکرد انتقال گرما در ساختار فوم ندارد. اما طبق یک مطالعه توسط لافدی و همکاران [۶۷]، تغییر در جهت‌گیری فوم حاوی PCM منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در دما شد. چنکاریندا و همکاران [۷۱] یک مطالعه تجربی برای مقایسه عملکرد سه روش (الف) PCM به همراه نانو فیبر گرافیتی (ب) PCM با ماتریس فوم کربن (ج) PCM با ماتریس فوم آلومینیوم انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که انتخاب روش، تأثیر معنی داری بر پاسخ گرمایی سیستم دارد. در توان ۵۰ وات پس از ۶۰ دقیقه، دمای سیستم با PCM خالص، PCM به همراه نانوذره، PCM با ماتریس فوم آلومینیوم و PCM با ماتریس فوم کربن به ترتیب به ۶۳

عبدالرحمان و همکارانش [۵۹] در بررسی تجربی خود از یک چاه گرمایی آلومینیومی با پره‌های سوزنی از جنس مس استفاده کردند و آن را با PCM تجاری RT35HC به همراه نانوذرات Al₂O₃ پر نمودند. آنها با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۱۱٪ تا ۱۷٪ موفق شدند که دمای سیستم را به میزان ۵۲/۳٪ کاهش دهند. در مطالعه‌ای که توسط فرزانه نیا و همکاران [۶۰] صورت گرفت، تغییرات دما در مقابل زمان برای چهار مورد مختلف بررسی شد. موارد شامل چاه گرمایی بدون پارافین، چاه گرمایی با کسر حجمی ۹۰٪ پارافین، چاه گرمایی به همراه PCM مخلوط شده با نانوذره ۰/۲٪ وزنی و چاه گرمایی به همراه PCM مخلوط شده با نانوذره ۲٪ وزنی است. در شکل ۴ دیده می‌شود که هنگام استفاده از PCM، زمان رسیدن به دمای بحرانی (۸۰ درجه سلسیوس) نسبت به چاه گرمایی بدون PCM افزایش یافته است. این زمان با استفاده از نانو PCM نیز افزایش بیشتری یافت. با انجام آزمایشات بیشتر مشاهده کردند که افزایش عملکرد نانو PCM نسبت به PCM با افزایش توان ورودی کاهش یافته است. همچنین بیان کردند که نانوذره با درصد وزنی بالاتر، در کاهش دمای سیستم بهتر عمل می‌کند. نتایج مشابهی توسط فیلیپس و همکاران [۶۱] و همزا و همکاران [۶۲] نیز مشاهده شد. همچنین مطالعات مجزایی در مورد عملکرد PCM و پایداری گرمایی آن در چرخه‌های مختلف گرمایش/سرمایش با حضور نانوذرات انجام شده که می‌توانند جهت بهبود شرایط کاربرد آن‌ها در بردهای الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرند [۶۳-۶۵].



شکل ۴- رفتار دما در مقابل زمان در چهار حالت مختلف [۶۰]

۴- استفاده از ماتریس فوم فلزی حاوی PCM

ذوب و انجماد PCM در فوم فلزی به دلیل وزن کم و افزایش بیشتر رسانایی گرمایی، امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است. گرمای نهان PCM به ذخیره انرژی گرمایی تولید شده توسط تراشه الکترونیکی کمک می‌کند، در حالیکه فوم فلزی به انتقال گرما از تراشه و به توزیع گرما در سراسر PCM کمک می‌کند. قبلاً پره‌های فلزی برای انتقال گرما از تراشه به PCM مورد استفاده قرار می‌گرفت اما انتقال گرما از طریق پره یکنواخت نبود و افزودن پره‌های فلزی، وزن سیستم را زیاد می‌کرد. سپس محققان از نانوذرات به عنوان تقویت کننده رسانایی گرمایی استفاده کردند. در این حالت افزایش رسانایی گرمایی بهتری برای NEPCM نسبت به PCM خالص مشاهده شد و تغییر وزن زیادی بر سیستم خنک کننده اعمال نمی‌شد. اما در توان‌های بالا، NEPCM شکست می‌خورد زیرا افزایش زیاد در توان باعث جداسازی نانوذرات می‌شد. همچنین سازگاری نانوذرات با نوع PCM نیز یک مسئله بود.

^۱ Pores Per Inch

درجه سلسیوس، ۵۳ درجه سلسیوس، ۶۲ درجه سلسیوس و ۵۸ درجه سلسیوس رسید. هنگامی که توان پس از ۸ دقیقه به ۳۰۰ وات افزایش یافت، دمای ثبت شده در کلیه موارد فوق به ترتیب ۲۱۴ درجه سلسیوس، ۲۰۵ درجه سلسیوس، ۱۶۰ درجه سلسیوس و ۱۶۴ درجه سلسیوس بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که PCM به همراه نانوذره نسبت به PCM خالص، در کنترل دما در توان‌های کم، موثرتر است، اما با افزایش توان سیستم، توان آن برای کنترل دما کاهش می‌یابد و عملکرد آن نیز در مقایسه با فوم آلومینیومی یا گرافیتی در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد.

۵- نتیجه گیری

در این بررسی، با مرور مطالعات انجام شده در جهت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای کنترل دمای بردهای الکترونیکی، تجزیه و تحلیل جامعی برای کاربرد پره‌های فلزی، نانوذرات و ماتریس فوم فلزی، به عنوان افزایش دهنده رسانای گرمایی PCM در چاه انجام شد که هر کدام از این سه روش به نوبه خود تاثیر بسزایی بر بهبود رفتار دمایی چاه گرمایی داشتند. به طور کلی نتایج زیر از بررسی و مقایسه پژوهش‌های پیشین بدست آمد:

- با افزایش توان الکتریکی، مدت زمان ذوب کاهش می‌یابد. به طوریکه با افزایش توان تا ۲۰٪، مدت زمان ذوب می‌تواند تا حدود ۴۰٪ کاهش یابد.

- در یک اندازه ثابت از چاه گرمایی، افزایش تعداد پره‌ها منجر به یکنواختی بهتر دمای پایه می‌شود. همچنین باعث افزایش زمان عملیاتی شده و دمای پایه را کاهش می‌دهد.

- در یک اندازه ثابت از چاه گرمایی، اگر افزایش تعداد پره‌ها منجر به کاهش حجم PCM شود، عملکرد آن در خنک سازی قطعه الکترونیکی، به دلیل کمتر شدن حجم PCM، کاهش می‌یابد. در حالیکه اگر حجم PCM ثابت نگه داشته شود، افزایش تعداد پره‌ها منجر به افزایش اندازه چاه گرمایی می‌شود، بنابراین عملکرد چاه گرمایی بهبود می‌یابد. در این صورت باید محدودیت فضایی قطعه، وزن و هزینه در نظر گرفته شود.

- بررسی شکل پره‌ها به عنوان TCE برای چاه گرمایی حاوی PCM نشان داد که پره‌های سوزنی بهتر از پره‌های صفحه‌ای عمل می‌کنند. استفاده از پره‌های سوزنی منجر به کاهش دمای پایه، یکنواختی دمای پایه و زمان عملیاتی طولانی‌تر می‌شود. زیرا پره‌های سوزنی شکل در مقایسه با پره‌های صفحه‌ای، سطح تماس بیشتری ایجاد می‌کنند و اختلاف دمایی تا حدود ۵۰٪ می‌تواند ایجاد کنند.

- افزایش ضخامت پره تا حدی می‌تواند باعث بهبود عملکرد چاه گرمایی شود و پس از مقدار بهینه، افزایش ضخامت پره باعث کاهش درصد کسر حجمی PCM می‌شود که باعث ناکارآمد شدن چاه گرمایی می‌گردد. به طوریکه افزایش ضخامت پره از ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر، می‌تواند دمای پایه چاه گرمایی را تا ۸٪ کاهش می‌دهد. اما هنگامی که ضخامت پره به ۶ میلی‌متر افزایش یافت، کاهش بیشتری در دمای پایه مشاهده نشد.

- ارتفاع پره نقش مهمی در عملکرد چاه گرمایی دارد. در پره‌هایی با ارتفاع کمتر، گرمای بیشتری در نزدیکی پایه متمرکز می‌شود درحالیکه در مورد پره‌های طولانی‌تر این گرما در سراسر دامنه توزیع می‌شود.

- بررسی میزان کسر حجمی PCM استفاده شده در چاه گرمایی نشان می‌دهد، دمای پایه و کسر ذوب به ترتیب به صورت معکوس و مستقیم با کسر حجمی PCM متناسب هستند.

- افزایش کسر حجمی نانوذرات در PCM استفاده شده در چاه گرمایی، عملکرد بهتری را برای چاه گرمایی ارائه می‌دهد. افزایش کسر حجمی نانوذرات به میزان ۰/۱۶٪ می‌تواند دمای سیستم را بیش از ۵۰٪ کاهش دهد.

- استفاده از ماتریس فوم فلزی به همراه PCM برای بهبود رسانایی گرمایی و افزایش عملکرد آن در خنک سازی قطعه الکترونیکی نشان داده است که با افزایش سطح توان قطعه، دمای پایه افزایش می‌یابد همانند آنچه در چاه گرمایی با پره‌های فلزی و نانوذرات مشاهده می‌شود.

- کاهش تخلخل فوم باعث بهبود عملکرد چاه گرمایی می‌شود. زیرا فوم با تخلخل کمتر، رسانایی گرمایی بهتری را از خود نشان می‌دهد. اما به دلیل نفوذپذیری کم‌تر، جابجایی کاهش می‌یابد.

در مجموع، بررسی نتایج مقالات مربوطه در این مطالعه و مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد، استفاده از پره‌های فلزی، نانوذرات و فوم فلزی به عنوان افزایش دهنده رسانایی گرمایی در عملکرد PCM منجر به عملکرد مشابهی در گرم‌زدایی یعنی کاهش دمای پایه و کاهش مدت زمان ذوب شده است. به نظر می‌رسد، در شار گرمایی زیاد، نانوذرات عملکرد بهتری نسبت به پره‌های فلزی دارند. همچنین چاه گرمایی به همراه فوم فلزی در شارهای گرمایی بالاتر منجر به کاهش بیشتری در دمای پایه در مقایسه با استفاده از PCM همراه نانوذرات می‌شود. در اکثر مطالعات، جنس چاه گرمایی و پره‌های فلزی، آلومینیومی در نظر گرفته شده است که به دلیل وزن سبک و مقاوم بودن در برابر خوردگی بوده است. در مواردی که PCM مورد استفاده خورنده نباشد و محدودیت وزن وجود نداشته باشد، پیشنهاد می‌شود از چاه گرمایی با جنس مس استفاده شود زیرا رسانایی گرمایی مس بسیار بیشتر از آلومینیوم است و در کاهش دمای پایه عملکرد بهتری خواهد داشت. از آنجاییکه مطالعات بسیار کمی بر روی مقایسه همزمان عملکرد پره‌های فلزی و فوم‌های فلزی حاوی PCM به عنوان TCE در کاهش دمای پایه چاه گرمایی تا کنون انجام شده است، انجام پژوهش‌های بیشتری در این زمینه می‌تواند نتایج جدیدی به همراه داشته باشد. همچنین بسیاری از قطعات الکترونیکی در شرایط واقعی به صورت مداوم تحت چرخه‌های گرمایش-سرمایش قرار می‌گیرند. تا کنون مطالعات محدودی در این زمینه نیز صورت گرفته است، لذا ادامه پژوهش‌ها و بررسی رفتار دمایی سیستم در هنگام استفاده از انواع تقویت کننده‌های رسانایی گرمایی در استفاده از PCMها در چرخه‌های پایایی، می‌تواند راهگشای مسیر کاربردی استفاده از PCMها برای شرایط واقعی گردد.

۶- مراجع

[۱] اشرفی م.، محمدیون ح.، دیبایی م.ج.، محمدیون م.، بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش. ۱، ص ۲۹-۳۸، ۱۴۰۰.

- [18] Kothari R., Sahu S.K., Kundalwal S.I., Mahalkar P., Thermal performance of phase change material-based heat sink for passive cooling of electronic components: An experimental study, *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, No. 4, pp. 5939-5963, 2021.
- [19] Leong K.Y., Chew S.P., Gurunathan B.A., K.K. Ahmad, H.C. Ong, An experimental approach to investigate thermal performance of paraffin wax and 1-hexadecanol based heat sinks for cooling of electronic system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, 2019.
- [20] Tan F., Tso C., Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied thermal engineering*, Vol.24, No.2-3, pp.159-169, 2004.
- [21] Yang Y-T., Wang Y-H., Numerical simulation of three-dimensional transient cooling application on a portable electronic device using phase change material. *International Journal of thermal sciences*, Vol. 51, pp.155-162, 2012.
- [22] Wirtz R., Swanson K., Yaquinto M., Thermal energy storage thermal response model with application to thermal management of high power-density hand-held electronics. *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 134, No. 1, 2012.
- [23] Ge H., Liu J., Keeping smartphones cool with gallium phase change material. *Journal of heat transfer*; Vol. 135, No.5, 2013.
- [24] Maxa J., Novikov A., Nowotnick M., Thermal peak management using organic phase change materials for latent heat storage in electronic applications. In: *Materials: Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, pp. 31, 2018.
- [25] Abhat A., Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*, Vol. 30, No.4, pp. 313-332, 1983.
- [26] Henze R.H., Humphrey J.A., Enhanced heat conduction in phase-change thermal energy storage devices. *International journal of heat and mass transfer*; Vol. 24, No. 3, pp.459-474, 1981.
- [27] Kandasamy R., Wang X-Q., Mujumdar A.S., Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks. *Applied thermal engineering*, Vol. 28, No. 8-9, pp. 1047-1057, 2008.
- [28] Nayak K., Saha S., Srinivasan K., Dutta P., A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 11-12, pp. 1833-1844, 2006.
- [29] Marri G.K., Srikanth R., Balaji C., Effect of phase change and ambient temperatures on the thermal performance of a solid-liquid phase change material-based heat sinks, *Journal of Energy Storage*, Vol. 30, 2020.
- [30] Fok S., Shen W., Tan F., Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No.1, pp. 109-117, 2010.
- [31] Setoh G., Tan F., Fok S., Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones. *International Communications in Heat and Mass Transfer*; Vol.37, No. 9, pp. 1403-1410, 2010.
- [32] Wu W., Zhang G., Ke X., Yang X., Wang Z., Liu C., Preparation and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials for electronic thermal management. *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 278-284, 2015.
- [33] Hosseinzadeh S., Tan F., Moosania S., Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17-18, pp. 3827-3838, 2011.
- [34] Baby R., Balaji C., Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 5-6, pp. 1642-1649, 2012.
- [35] Alimohammadi M., Aghli Y., Alavi E.S., Sardarabadi M., Passandideh-Fard M. Experimental investigation of the effects of using nano/phase change materials (NPCM) as coolant of electronic chipsets, under free and forced convection. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, pp. 271-279, 2017.
- [2] Naghibi Z., Carriveau R., Ting D.S.K., Improving clean energy greenhouse heating with solar thermal energy storage and phase change materials, *Energy Storage*, Vol.2, NO.1,2020.
- [۳] رستمیان ف، اعتصامی ن، حقیگو م، کنترل دمای برد الکترونیکی با بکارگیری چاه گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده استناریک اسید، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹.
- [۴] پاکدامان س، سید افقهی س، حسن زاده م، تهیه میکروکپسول هگزادکان-ملامین فرمالدهید به عنوان ماده تغییرفازدهنده و اعمال آن بر پارچه پنبه ای برای تولید لباس های خنک کننده، مجله پژوهش‌های کاربردی در شیمی، ش. ۲، ص ۶۰-۵۳، ۱۳۹۸.
- [5] پناهی ر، مواد تغییر فازدهنده و استفاده آنها در جهت صرفه‌جویی انرژی در ساختمان، نشریه علمی مطالعات مهندسی، ش.۳۶، ص ۴۷-۶۱، ۱۳۹۷.
- [6] سلگی ا، محمدکاری ب، فیاض ر، حسینی ب، طاهری ه، افزایش عملکرد تهویه شبانه در ساختمان های اداری با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، نمونه موردی: شهر یزد، مجله معماری و شهرسازی آرمان شهر، ش.۱۷، ص ۵۳-۶۲، ۱۳۹۵.
- [۷] آل حسینی ا، جعفری م، جلوگیری از افزایش دمای محصولات غذایی بسته‌بندی شده در زنجیره سرد با استفاده از مواد جاذب انرژی حرارتی، فصلنامه علمی علوم و فنون بسته بندی، ش. ۳۹، ص ۱۸-۲۷، ۱۳۹۸.
- [8] Ohkawara H., Kitagawa T., Fukushima N., Ito T., Sawa Y., Yoshimine T., A newly developed container for safe, easy, and cost-effective overnight transportation of tissues and organs by electrically keeping tissue or organ temperature at 3 to 6 C. In: *Transplantation proceedings: Elsevier*, pp. 855-858, 2012.
- [9] Ukrainczyk N., Kurajica S., Šipušić J., Thermophysical comparison of five commercial paraffin waxes as latent heat storage materials, *Chemical and biochemical engineering quarterly*, Vol. 24, No. 2, pp.129-137., 2010.
- [10] Mofijur M., Mahlia T.M.I., Silitonga A.S., Ong H.C., Silakhori M., Hasan M.H., Putra N., Rahman S., Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: an overview, *Energies*, Vol.12, No. 16, 2019.
- [11] Wilson J., Gobble C., Chickos J., Vaporization, sublimation, and fusion enthalpies of some saturated and unsaturated long chain fatty acids by correlation gas chromatography, *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 60, No. 1, pp. 202-212, 2015.
- [۱۲] معین جهرمی م، رحمانیان س، بزرگرلو کوهی ص، تحلیل اثر هندسه جاذب حرارتی با بکارگیری میردهای نانوسیال و مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله بر عملکرد پنل های حرارتی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹.
- [13] Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M., A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 14, No.2, pp.615-628, 2010.
- [14] Sami S., Etesami N., Thermal characterization of obtained microencapsulated paraffin under optimal conditions for thermal energy storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 130, No. 3, pp. 1961-1971, 2017.
- [15] Sami S., Sadrameli S., Etesami N., Thermal properties optimization of microencapsulated a renewable and non-toxic phase change material with a polystyrene shell for thermal energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, Vol.130, pp.1416-1424, 2018.
- [16] Sami S., Etesami N., Improving thermal characteristics and stability of phase change material containing TiO₂ nanoparticles after thermal cycles for energy storage. *Applied Thermal Engineering*; Vol.124, pp. 346-352, 2017.
- [17] Khodadadi J., Fan L., Babaei H., Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.24, pp. 418-444, 2013.

- [55] Hu J., Hu R., Luo X., Phase change material-based heat sinks and its geometry optimization for heat transfer enhancement. pp. 876-881, 2014.
- [56] Sivapragasam A., Duraisamy S., Raman M., Experimental investigation on thermal performance of plate fin heat sinks with nano PCM, *Thermal Science*, Vol. 24, pp.437-446, 2020.
- [57] Zarma I., Ahmed M., Ookawara S., Enhancing the performance of concentrator photovoltaic systems using Nanoparticle-phase change material heat sinks, *Energy Conversion and Management*, Vol. 179, pp. 229-242, 2019.
- [58] Fan L-W., Zhu Z-Q., Zeng Y., Xiao Y-Q., Liu X-L., Wu Y-Y., Transient performance of a PCM-based heat sink with high aspect-ratio carbon nanofillers. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 75, pp. 532-540, 2015.
- [59] Abdelrahman H., Wahba M., Refaey H., Moawad M., Berbish N., Performance enhancement of photovoltaic cells by changing configuration and using PCM (RT35HC) with nanoparticles Al₂O₃, *Solar Energy*, Vol.177, pp. 665-671, 2019
- [60] Farzanehnia A., Khatibi M., Sardarabadi M., Passandideh-Fard M., Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin-based heat sink for electronic device thermal management. *Energy conversion and management*, Vol.179, pp.314-325, 2019.
- [61] Phillips M.R., Green C.E., Cola B.A., Numerical and Experimental Investigation of Vertically Aligned Carbon Nanotube-Phase Change Material Composites for Thermal Management of Electronics. In: *2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm): IEEE*, pp. 141-146, 2018.
- [62] Hamza F., Mustapha F., Effect of Nanoparticles Insertion on Heat Storage Efficiency in a Phase Change Material/Embedded and Intelligent Systems. pp. 1-5, 2019.
- [63] Harish S., Orejon D., Takata Y., Kohno M., Thermal conductivity enhancement of lauric acid phase change nanocomposite with graphene nanoplatelets. *Applied thermal engineering*, Vol. 80, pp. 205-211, 2015.
- [64] Babapoor A., Karimi G., Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin nanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization. *Applied Thermal Engineering*, Vol.90, pp.945-951, 2015.
- [65] Şahan N., Fois M., Paksoy H., Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 137, pp. 61-67, 2015.
- [66] Kothari R., Sahu S.K., Kundalwal S.I., Mahalkar P., Thermal performance of phase change material-based heat sink for passive cooling of electronic components: An experimental study, *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, No. 4, pp. 5939-5963, 2021.
- [67] Lafdi K., Mesalhy O., Elgafy A., Merits of employing foam encapsulated phase change materials for pulsed power electronics cooling applications. *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 130, No. 2, 2008.
- [68] Ali H.M., Experimental study on the thermal behavior of RT-35HC paraffin within copper and Iron-Nickel open cell foams: energy storage for thermal management of electronics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 146 2020.
- [69] Qu Z., Li W., Wang J., Tao W., Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink. *International communications in heat and mass transfer*; Vol. 39, No.10, pp. 1546-1549, 2012.
- [70] Baby R., Balaji C., Experimental investigations on thermal performance enhancement and effect of orientation on porous matrix filled PCM based heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*; Vol.46, pp. 27-30, 2013.
- [71] Chintakrinda K., Weinstein R.D., Fleischer A.S., A direct comparison of three different material enhancement methods on the transient thermal response of paraffin phase change material exposed to high heat fluxes. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 9, pp. 1639-1647, 2011.
- [36] Arshad A., Ali H.M., Khushnood S., Jabbar M., Experimental investigation of PCM based round pin-fin heat sinks for thermal management of electronics: effect of pin-fin diameter. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 861-872, 2018.
- [37] Kalbasi R., Afrand M., Alsarraf J., Tran M.-D., Studies on optimum fins number in PCM-based heat sinks, *Energy*, Vol.171, pp. 1088-1099, 2019.
- [38] Baby R., Balaji C., Thermal optimization of PCM based pin fin heat sinks: an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 1, pp.65-77, 2013.
- [39] Jaya Krishna D., Operational time and melt fraction based optimization of a phase change material longitudinal fin heat sink. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 10, No. 6, 2018.
- [40] Mahmoud S., Tang A., Toh C., Raya A-D., Soo S.L., Experimental investigation of inserts configurations and PCM type on the thermal performance of PCM based heat sinks. *Applied energy*, Vol. 112, pp. 1349-1356, 2013.
- [41] Mosavi A., Mehdizadeh H., Abbasian-Naghneh S., Kalbasi R., Karimipour A., Cheraghian G., Incorporation of horizontal fins into a PCM-based heat sink to enhance the safe operation time, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 18, 2020.
- [42] Sathe T., Dhoble A., Thermal analysis of an inclined heat sink with finned PCM container for solar applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 144, 2019.
- [43] Taghilou M., Khavasi E., Thermal behavior of a PCM filled heat sink: The contrast between ambient heat convection and heat thermal storage, *Applied Thermal Engineering*, Vol.174, 2020.
- [44] همتی ر.، ویسی ف.، حدیدی ب.، بررسی تجربی سیستم مدیریت حرارتی منبع تغذیه با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، مجله مهندسی و مدیریت انرژی، ش. ۱، ص ۹۲-۹۹، ۱۳۹۹.
- [45] Ali H.M., Ashraf M.J., Giovannelli A., Irfan M., Irshad T.B., Hamid H.M., Thermal management of electronics: an experimental analysis of triangular, rectangular and circular pin-fin heat sinks for various PCMs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; Vol.123, pp. 272-284, 2018.
- [46] Arshad A., Jabbar M., Sardari P.T., Bashir M.A., Faraji H., Y. Yan, Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol.18, 2020.
- [47] S. Rukh, R.A. Pasha, M.A. Nasir, Heat transfer enhancement of round pin heat sinks using N-eicosane as PCM: an experimental study, *Heat and Mass Transfer*, Vol.55, No. 2, pp. 309-325,2019.
- [48] Pakrouh R., Hosseini M.J., Ranjbar A.A., A parametric investigation of a PCM-based pin fin heat sink. *Mech Sci*; Vol.6, No.1, pp. 65-73, 2015.
- [49] Levin P.P., Shitzer A., Hetsroni G., Numerical optimization of a PCM-based heat sink with internal fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; Vol. 61, pp.638 -645, 2013.
- [50] Wang X-Q., Yap C., Mujumdar A.S., A parametric study of phase change material (PCM)-based heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 8, pp.1055-1068, 2008.
- [51] Jaworski M., Thermal performance of heat spreader for electronics cooling with incorporated phase change material. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 35, pp. 212-219, 2012.
- [52] Ye W-B., Zhu D-S., Wang N., Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No.17-18, pp. 3871-3884, 2011.
- [53] Ye W-B, Zhu D-S, Wang N. Fluid flow and heat transfer in a latent thermal energy unit with different phase change material (PCM) cavity volume fractions. *Applied thermal engineering*, Vol. 42, pp.49-57, 2012.
- [54] Rostamizadeh M., Khanlarkhani M., Sadrameli S.M., Simulation of energy storage system with phase change material. *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp.419-422, 2012.