

# کنترل دمای برد الکترونیکی با بکارگیری چاه گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده استئاریک اسید

فائزه رستمیان

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، frostamian@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

در این پژوهش، مدیریت دمای برد الکترونیکی با استفاده از یک چاه گرمایی آلومینیومی مربع شکل با ۹ پره حاوی ماده تغییر فاز دهنده (PCM) بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. استئاریک اسید از دسته اسیدهای چرب به عنوان PCM با توجه به دمای بحرانی برد الکترونیکی (C ۸۵ °) و توان تولیدی در آن، انتخاب شد. اثر تغییر توان الکتریکی بصورت ثابت و متناوب و نیز کسر حجمی‌های مختلف از PCM (۱۱، ۲۵ و ۵۰ درصد) بر تغییرات دمای برد بررسی شد. نتایج نشان داد، استفاده از PCM با کسر حجمی ۱۱٪ در توان ۴ وات، ۲۰ دقیقه زمان امن عملیاتی را افزایش می‌دهد. افزایش کسر حجمی از ۱۱٪ به ۵۰٪ در توان ۶ وات، باعث شد محدوده ذوب PCM، به میزان ۸۷۸ ثانیه افزایش یابد و زمان امن عملیاتی ۱۴ دقیقه بیشتر شود. آزمایشات با توان الکتریکی متناوب (۱۰ دقیقه روشن و ۸۰ دقیقه خاموش) در چند چرخه گرمایش-سرمایش پیاپی و در توان‌های بالا (۱۰، ۱۵ و ۱۸ وات) نشان داد، حساسیت عملکرد چاه گرمایی به درصد حجمی PCM در توان‌های بالا بسیار بیشتر از توان‌های پایین است. **واژه‌های کلیدی:** مواد تغییر فاز دهنده، استئاریک اسید، چاه گرمایی، خنک سازی برد الکترونیکی، مدیریت دمایی، چرخه‌های گرمایش و سرمایش.

## Control of Electronic board temperature using heat sink containing stearic acid as a phase change material

F. Rostamian

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

N. Etesami

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

M. Haghgoo

Iranian Space Research center, Tehran, Iran

## Abstract

In this study, management of the electronic board temperature using an aluminum heat sink with 9 fins containing phase change material (PCM) was investigated, experimentally. The critical temperature of the electronic board was 85 °C and according to this temperature, stearic acid was selected as PCM for temperature management of the system. Experiments were performed in the wide power range and in different volume fractions of PCM. Using PCM at 11% volume fractions at power of 4 W significantly increased 20 minutes the operating time of the electronic board. Increasing the volume fraction of PCM from 11% to 50% at the power of 6 W, increased PCM melting range by 878 seconds and increased the operating time by 14 minutes. Experiments with alternative power (10 minutes on and 80 minutes off) in several consecutive heating-cooling cycles and at high powers (10, 15 and 18 watts) showed that the sensitivity of heat sink performance to PCM volume percentage at high powers is more than in low powers.

**Keywords:** Phase change materials, Stearic acid, Heat sink, Electronic board cooling, Temperature management, Heating and cooling cycles.

انتقال گرما در قطعات الکترونیکی از جمله بردهای الکترونیکی به دلیل عدم نیاز به توان اضافی برای به حرکت در آوردن سیال عامل، سبک تر بودن قطعات مورد استفاده و کم هزینه تر بودن نسبت به روش‌های فعال، بسیار مورد استقبال قرار گرفته است [۱، ۲]. اخیراً سیستم ذخیره انرژی گرمایی نهان (LHTESS) برای خنک سازی دستگاه‌های الکترونیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یک ماده تغییر فاز دهنده (PCM)، توانایی جذب مقدار زیادی گرما در ساختار خود و دفع این گرما به محیط اطراف را دارد. جذب و دفع گرما در هنگام تغییر فاز مایع-جامد اتفاق می‌افتد [۳]. 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. مقالات بسیاری در مورد کاربرد PCM برای ذخیره انرژی گرمایی وجود دارد [۴-۸]. در این بررسی‌ها در مورد انواع مختلف PCM، خصوصیات

## ۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت تجهیزات الکترونیکی و گستره کاربرد آنها، برای اطمینان از کارکرد قطعه در شرایط ایمن، لازم است تا فناوری انتقال گرما در آن تقویت شده و کنترل دما مورد توجه قرار گیرد. زیرا با شروع کار هر وسیله‌ای که در آن از تراشه‌ها یا بردهای الکترونیکی استفاده شود، گرما در آن تولید می‌شود و برای مدیریت دمایی آن، این گرما باید به طور مناسبی منتقل شود. تا کنون روش‌های مختلفی برای انتقال گرما و خنک کردن وسایل الکترونیکی معرفی شده‌اند که شامل روش‌های فعال ( فن، میکروکانال‌ها، خنک‌کننده‌های پاششی) و روش‌های غیرفعال ( چاه گرمایی، پخش کننده‌های گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده) می‌باشد. هدف اصلی در تمامی روش‌ها افزایش انتقال گرما است. در این میان استفاده از روش‌های غیرفعال برای

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: netesami@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۶

گرمایی/فیزیکی، کپسوله کردن PCM، مشکلات مربوط به تغییر فاز، مسائل مربوط به سیستم و کاربرد آن در زمینه‌های مختلف بحث شده است. در این میان اسیدهای چرب به دلیل خواص مطلوب مانند رفتار ذوب/انجماد سازگار، پدیده فوق سرمایش کم، سمی نبودن و دسترسی آسان، ترجیح داده می‌شوند.

در خنک سازی بردهای الکترونیکی به کمک چاه گرمایی حاوی PCM، پارامترهای مختلفی از جمله میزان توان الکتریکی اعمال شده، تعداد پره‌ها، مشخصه‌های هندسی، تغییرات جهت‌گیری، نوع PCM انتخابی و کسر حجمی PCM بر رفتار چاه گرمایی تاثیر گذار هستند که مطالعات قبلی تاحدودی به آنها پرداخته شده است.

وی و مالن [۹] میزان افزایش در رسانایی گرمایی سیستم حاوی PCM را با استفاده از مش‌های کامپوزیتی با رسانایی گرمایی بالا مطالعه کردند. آن‌ها با توجه به نتایج بدست آمده، گزارش کردند که PCMها برای مهار سریع انرژی گرمایی می‌توانند به کار گرفته شوند و قابلیت استفاده در تجهیزات الکترونیکی با کاربردهای مختلف را دارا هستند.

ارشد و همکاران [۱۰] به صورت تجربی تاثیر شارهای گرمایی ثابت در مقدارهای مختلف را بر روی رفتار واکس پارافینی به عنوان PCM بررسی کردند. طیف وسیعی از شار گرمایی از  $1/6 \text{ kW/m}^2$  تا  $3/2 \text{ kW/m}^2$  در نظر گرفته شد. مشاهده شد که با افزایش توان ورودی، فاز گرمایش نهان کوتاه‌تر می‌شود. همچنین در شار گرمایی  $1/6 \text{ kW/m}^2$  هیچ تغییر فازی رخ نداد که نشان می‌دهد شار گرمایی  $1/6 \text{ kW/m}^2$  برای ذوب PCM کافی نبوده است. اما یک تغییر فاز سریع برای شار گرمایی  $3/2 \text{ kW/m}^2$  مشاهده شد. حسینی زاده و همکاران [۱۱] تغییرات دما را برای سه مقدار توان ثابت (۲۵، ۳۵ و ۴۵ وات) به طور تجربی و عددی (مدل دوبعدی و سه بعدی) برای PCM تجاری RT-۸۰ بررسی کردند. علت انتخاب این توان زیاد، خارج کردن گرما از ریزپردازنده توسط چاه گرمایی حاوی PCM بود. زیرا ریزپردازنده‌ها در توان‌های بالایی کار می‌کنند. در این بررسی نیز مشخص شد که برای سطح توان بالاتر، سرعت ذوب افزایش می‌یابد. بنابراین طول دوره ذوب کوتاه می‌شود و فرایند ذوب به دمای بالاتری انتقال پیدا می‌کند.

مطالعه جامعی در مورد عملکرد چاه گرمایی مبتنی بر PCM با تغییر تعداد پره‌ها (۲، ۴ و ۸) و در نظر گرفتن پدیده جابجایی در مذاب PCM توسط نایاک و همکاران [۱۲] به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. آنها با جایگزینی مقدار مساوی از PCM و ثابت نگه داشتن ضخامت پره‌ها، تعداد پره‌ها را افزایش دادند و دریافتند که با افزایش تعداد پره‌ها، دمای پایه ۷ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد اما طول بازه زمانی ذوب برای ۸ پره تفاوت چندانی با ۲ پره ندارد. علاوه بر این، آن‌ها مشاهده کردند که هرچه تعداد پره‌ها بیشتر باشد، یکنواختی دما به دلیل توزیع دمای بهتر افزایش می‌یابد. ساها و همکاران [۱۳] توزیع بهینه پره‌ها را در چاه گرمایی مطالعه کردند. آنها از ۳۶ و ۹ پره سوزنی شکل در کسر حجمی ۸٪ از PCM و توان ثابت ۴ وات استفاده کردند. در هنگام استفاده از چاه گرمایی حاوی PCM با ۳۶ پره به دلیل در دسترس بودن سطح تماس گرمایی بزرگتر، قادر است دمای بُرد را در مقادیر کمتری کنترل نماید. نتیجه مشابهی نیز توسط غربی و همکاران [۱۴] بدست آمد.

پاکروح و همکاران [۱۵] در مطالعات تجربی خود دریافتند، با افزایش ارتفاع پره، عملکرد چاه گرمایی افزایش می‌یابد. زیرا سطح انتقال گرما با افزایش ارتفاع پره افزایش می‌یابد. ماهروس [۱۶] نیز مطالعه تجربی بر روی چاه گرمایی حاوی PCM انجام داد و تاثیر تعداد و آرایش پره‌ها را بررسی نمود. PCM مورد استفاده در این بررسی واکس پارافینی بود. مشاهده شد که هم نرخ افزایش گرما و هم دمای بیشینه در قطعه با استفاده از چاه گرمایی حاوی PCM کاهش می‌یابد. یانگ و همکاران [۳] توانایی چاه گرمایی حاوی PCM در برخورد با شوک گرمایی فوق العاده بالا را به صورت نظری و عددی بررسی کردند. چاه گرمایی حاوی گالیوم و دارای پره‌های مسی بود و ساختارهای مختلف پره‌های مسی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از مس در شرایط شوک گرمایی بالا، مفید است.

کلباسی و سلیم پور [۱۷] برای افزایش زمان رسیدن دمای برد به دمای بحرانی، مطالعه ای عددی انجام دادند و تاثیر افزایش پره‌های افقی به چاه گرمایی حاوی PCM را مدلسازی و بررسی کردند. عواملی مانند تعداد محفظه‌ها، نسبت ابعاد چاه گرمایی و میزان PCM نیز بررسی شدند. نتایج حاکی از آن بود که تعداد بهینه‌ای از پره‌ها برای رسیدن به هدف مورد نظر وجود دارد. علاوه بر این گزارش کردند که تغییر ویژگی‌های هندسی مخزن گرما عملکرد سیستم را بهبود نمی‌بخشد. وو و همکاران [۱۸] بردی با استفاده از یک ماتریس گرافیتی منبسط شده حاوی پارافین برای مدیریت گرمایی قطعات الکترونیکی تهیه کردند و با یک برد صفحه ای آلومینیومی و نیز یک برد آلومینیومی پره دار مقایسه کردند و گزارش کردند که در این حالت، ظرفیت ذخیره گرمایی و رسانایی گرمایی بالاتری حاصل شده و قابلیت مناسبی در مدیریت گرمایی بردهای الکترونیکی و دیگر کاربردهای مختلف خنک سازی دارد.

علی و ارشد [۱۹] چاه گرمایی با پره‌های سوزنی دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و در این بررسی از ان-ایکوزان (n-eicosane) به عنوان PCM استفاده کردند. چاه گرمایی آلومینیومی با پیکربندی‌های مختلف و ضخامت‌های متفاوت با کسر حجمی متغیر از PCM استفاده شد. نتایج نشان داد که چاه گرمایی با ضخامت پره ۳ میلی‌متر، بیشترین افزایش را در زمان عملیاتی ایمن داشته است. ارشد و همکاران [۲۰] عملکرد سیستم خنک کننده را با استفاده از چاه گرمایی حاوی واکس پارافین برای بررسی دمای پایه، تجزیه و تحلیل کردند. این بررسی در ضخامت‌های مختلفی از پره، کسر حجمی‌های مختلف از PCM و شار گرمایی مختلف انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. آن‌ها گزارش کردند که حداکثر زمان عملیاتی این سیستم، برای پره‌های مربعی با ضخامت ۲ میلی‌متر و در کسری حجمی ۱۰٪ از PCM حاصل می‌شود. ارشد و همکاران [۲۱] همچنین به طور تجربی عملکرد چاه گرمایی با پره‌های سوزنی را با استفاده از ان-ایکوزان و واکس پارافین به عنوان PCM، در ۴ پیکربندی مختلف مورد بررسی قرار دادند در این بررسی نیز کسر حجمی PCM و ضخامت پره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای ان-ایکوزان در ضخامت ۲ میلی‌متر بهترین عملکرد گرمایی بدست می‌آید، در حالی که برای پارافین بهترین عملکرد در قطر ۳ میلی‌متر از پره‌ها اتفاق می‌افتد. نتایج مشابهی توسط علی و همکاران [۲۲] نیز ارائه شد. اشرف و همکاران [۲۳] عملکرد چاه گرمایی حاوی PCM با پیکربندی

رفتار دمایی قطعه در چرخه‌های پیاپی و به صورت پیوسته مورد بررسی قرار گیرد تا شرایط واقعی برای سیستم آزمایشگاهی شبیه سازی شود. همچنین اکثر مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته مربوط به محدوده توان‌های الکتریکی زیر ۱۰ وات بوده است و به دلیل دشواری‌های موجود در کار عملی، به ندرت درتوان‌های بالا گزارشی ارائه شده است، مگر در مطالعات عددی که محدودیتی وجود ندارد. لذا در این مطالعه علاوه بر توان ثابت برد، توان‌های متناوب و چرخه های گرمایش-سرمایش برد، در توان‌های بالا تا محدوده ۱۸ وات بررسی شده است. همچنین در تعداد بسیار کمی از پژوهش‌ها از استتاریک اسید به عنوان PCM استفاده شده است. با توجه به اینکه این ماده از گروه آلی و از خانواده اسیدهای چرب می‌باشد، دارای رفتار ذوب/انجماد سازگار، فوق سرمایش کم، فشار بخار کم در دمای عملیاتی، غیر سمی و دسترسی آسان است. علاوه بر این، این ماده از گرمای نهان بسیار خوبی برخوردار است و توانایی بالایی در ذخیره‌سازی انرژی دارد [۳۱،۳۲]. همچنین پایداری گرمایی این ماده سبب می‌شود که نقطه ذوب و انتالپی آن در چرخه‌های سرمایش-گرمایش پیوسته تغییر قابل توجهی نداشته باشد [۳۳-۳۵]. بنابراین با توجه به توان بالای برد، این PCM می‌تواند گزینه مناسبی باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد. در پژوهش حاضر، مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک برد الکترونیکی مورد استفاده در تجهیزات فضایی متمرکز شده است که بصورت چرخه های خاموش-روشن کار می‌کند و لازم است دمای آن برای افزایش عمر مفید و کارکرد ایمن، در زیر ۸۵ درجه سانتی‌گراد کنترل شود. با توجه به اینکه دمای ذوب استتاریک اسید استفاده شده در این پژوهش ۶۱-۶۳ درجه سلسیوس است، می‌تواند به صورت موثری در کنترل دمای برد عمل کند و زمان عملیاتی را افزایش دهد. همچنین به دلیل خاموش-روشن شدن برد مربوطه در شرایط کارکرد، لازم است عملکرد چاه گرمایی حاوی PCM در چرخه‌های متوالی مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه تاثیر عواملی از جمله میزان توان اعمالی و کسر حجمی PCM در دو حالت اعمال توان الکتریکی ثابت و متناوب، بررسی و با یکدیگر مقایسه گردیده است.

## ۲- مبانی و روش‌ها

### ۲-۱- دستگاه آزمایشگاهی

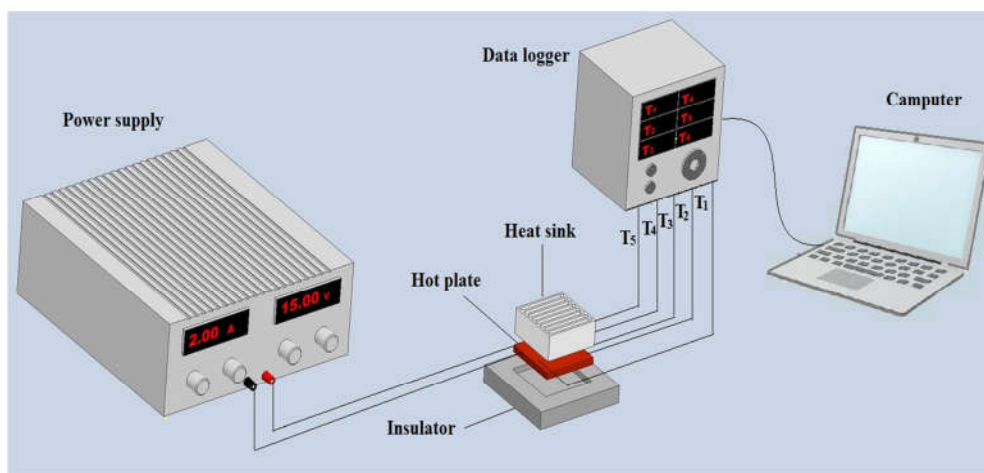
آزمایشات مربوط به خنک سازی برد الکترونیکی با استفاده از چاه گرمایی حاوی PCM، با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی شکل ۱ انجام گرفت. این دستگاه شامل منبع تغذیه، گرمکن صفحه‌های شبیه سازی شده با برد الکترونیکی، ترموکوپل‌های نوع K، چاه گرمایی، PCM، دستگاه ثبت داده‌های دمایی و رایانه برای خواندن اطلاعات ارسالی از دستگاه ثبت داده‌ها می‌باشد.

چاه گرمایی مورد استفاده در این پژوهش از جنس آلومینیوم (Al-۶T-۶۰۶) با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ می‌باشد که دارای پیکربندی مربعی با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر با ۹ پره با ضخامت ۱/۳ میلی‌متر است و در شکل ۲ نشان داده شده است. حجم چاه گرمایی ۵۰×۵۰×۲۰ میلی‌متر می‌باشد که در هر آزمایش با کسر حجمی‌های متفاوتی از PCM پر می‌شود. در این بررسی PCM مورد استفاده استتاریک اسید (Merck, Germany) می‌باشد که خصوصیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. کسر حجمی PCM که با  $\psi$  نشان داده می‌شود.

مربعی و دایره‌ای را بررسی کردند. آن‌ها از ۶ نوع PCM مختلف با ثابت نگه داشتن کسر حجمی در ۹٪، و در محدوده توان ۴-۸ وات استفاده کردند. نتایج حاکی نشان داد، پیکربندی دایره‌ای به عنوان کارآمدترین حالت برای چاه گرمایی حاوی PCM است و پیکربندی مربعی برای حالت بدون PCM بهترین نتایج را داشته است.

تحقیقات مشابهی توسط بیبی و بالاجی [۲۴] برای بهبود مدت زمان عملیاتی تا رسیدن به دمای بحرانی معین، انجام شد. در این بررسی از پره‌های سوزنی و صفحه‌ای به عنوان افزایش دهنده رسانایی گرمایی (TCE) در کسر حجمی ثابتی از PCM و در محدوده توان ۲ تا ۷ وات، استفاده شد و مشخص شد که عملکرد پره‌های سوزنی در افزایش زمان عملیاتی، بهتر از پره‌های صفحه‌ای بوده است. فوک و همکاران [۲۵] آزمایشاتی را برای بررسی رفتار چاه گرمایی در حالت بدون پره، ۳ پره و ۶ پره با استفاده از ایکوزان به عنوان PCM انجام دادند و مشاهده کردند که چاه گرمایی ۶ پره‌ای به علت داشتن سطح انتقال گرمای بیشتر، بهترین عملکرد را در افزایش زمان عملیاتی برد از خود نشان داده است. تحقیقات بیشتری نیز به طور تجربی توسط بیبی و بالاجی [۲۶] بر روی چاه گرمایی حاوی PCM با تغییر تعداد پره‌ها و کسر حجمی PCM انجام شد. در ادامه آزمایشات دیگری را نیز به صورت عددی برای یافتن بهترین پیکربندی در چاه گرمایی انجام دادند [۲۷]. آنها عملکرد چاه گرمایی را با استفاده از پره‌های سوزنی شکل با تعداد ۳، ۷۲ و ۱۲۰، برای کسر حجمی مختلفی از PCM (۰/۳، ۰/۶ و ۱) مطالعه کردند و گزارش کردند، چاه گرمایی با ۷۲ پره بهترین عملکرد گرمایی را در تمام سطوح توان (۵-۸ وات) در مقایسه با ۳۳ و ۱۲۰ پره نشان می‌دهد. در ادامه [۲۸] عملکرد چاه گرمایی را با PCM و بدون آن، تحت شارهای گرمایی مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی سه دمای بحرانی ۴۲، ۴۷ و ۵۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و با استفاده از کسر حجمی‌های مختلفی از ایکوزان به عنوان PCM، میزان افزایش در زمان عملیاتی را در هر سه دمای بحرانی اندازه گیری و گزارش نمودند. سریکانت و همکاران [۲۹] نتایج حاصل از بهینه‌سازی عددی و تجربی چاه گرمایی حاوی PCM با پره‌های سوزنی کامپوزیتی را گزارش کردند. هدف اصلی در این بررسی، افزایش زمان عملیاتی چرخه گرمایش و به حداقل رساندن زمان خنک سازی در چرخه سرمایش با استفاده از بهینه سازی ابعاد چاه گرمایی بود. در حالت بهینه زمان عملیاتی چرخه گرمایش ۵٪ و زمان خنک سازی در چرخه سرمایش ۱۲٪ کاهش پیدا کرد.

هو و همکاران [۳۰] تاثیر نقطه ذوب و کسر حجمی PCM را بر رفتار دمایی چاه گرمایی با پره سوزنی بررسی کردند. نتایج نشان داد که PCM با نقطه ذوب بالاتر، کنترل دمای بهتری را برای سیستم فراهم می‌کند و مدت زمان بیشتری می‌تواند سیستم را در زیر دمای بحرانی نگه دارد. همچنین افزایش میزان PCM، زمان عملیاتی را افزایش داد. از تاریخچه مرور شده می‌توان دریافت، بیشتر پژوهش‌های انجام شده اثر پارامترهای هندسی چاه و پره را مورد مطالعه قرار داده اند و نیز رفتار چاه گرمایی در کنترل دمای برد را در شرایط توان الکتریکی ثابت بررسی کرده‌اند. تعداد محدودی از آن‌ها تغییرات دما با زمان را در توان متناوب و به صورت چرخه ای مورد بررسی قرار داده‌اند. این در حالیست که بسیاری از قطعات الکترونیکی در شرایط واقعی به صورت مدام تحت چرخه‌های گرمایش-سرمایش قرار می‌گیرند، لذا نیاز است،



شکل ۱ - دستگاه آزمایشگاهی

تولید شده در صفحه داغ به چاه گرمایی برسد. به منظور بررسی رفتار دمایی سیستم، از ۵ ترموکوپل نوع K (محدوده دمایی ۴۰- تا ۲۵۰ درجه سلسیوس با حداکثر خطای ۰/۱ °F درجه سلسیوس) استفاده شده است که در موقعیت‌های مکانی مختلف از جمله صفحه داغ، کف و دیواره‌های چاه گرمایی جاگذاری شده‌اند که در جدول ۲ معرفی شده و جانمایی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور دست یافتن به دقت بیشتر در آزمایشات، از دو ترموکوپل  $T_1$  و  $T_2$  در صفحه داغ استفاده شده و در نمودارها میانگین دمایی این دو ترموکوپل گزارش شده است. همچنین ترموکوپل‌های  $T_3$  تا  $T_5$  به منظور بررسی رفتار دمایی چاه گرمایی و اندازه‌گیری میزان اختلاف دمایی آن با صفحه داغ تعبیه شده‌اند.

و به صورت نسبت حجم PCM به گنجایش کلی چاه گرمایی تعریف می‌شود، از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\Psi = \frac{V_{PCM}}{V_s - V_f} \quad (1)$$

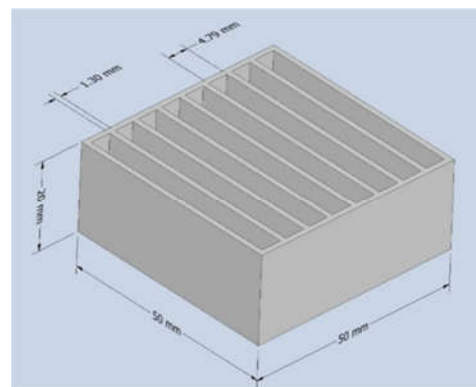
که در آن  $V_s$  حجم چاه گرمایی،  $V_f$  حجم پرها و  $V_{PCM}$  حجم PCM می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات مواد استفاده شده در آزمایشات

| مواد                          | k (W/m.K) | C (kJ/kg.K) | L (kJ/kg) | $T_m$ (°C) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------------------------|
| آلومینیوم [۲۳]                | ۱۸۰       | ۹۶۳         | ۲۸۹       | ۶۶۰/۴      | ۲۷۰۰                        |
| استاریک اسید(کدتجار ی ۸۰۰۶۷۳) | ۰/۱۷۳     | ۱/۷۶        | ۱۹۱/۴     | ۶۱/-۶۳     | ۹۴۰                         |

جدول ۲- موقعیت مکانی ترموکوپل‌ها

| مواد                          | k (W/m.K) | C (kJ/kg.K) | L (kJ/kg) | $T_m$ (°C) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------------------------|
| آلومینیوم [۲۳]                | ۱۸۰       | ۹۶۳         | ۲۸۹       | ۶۶۰/۴      | ۲۷۰۰                        |
| استاریک اسید(کدتجار ی ۸۰۰۶۷۳) | ۰/۱۷۳     | ۱/۷۶        | ۱۹۱/۴     | ۶۱/-۶۳     | ۹۴۰                         |

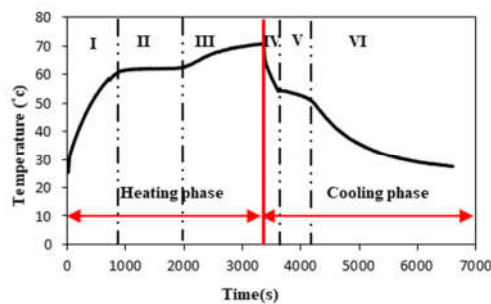


شکل ۲- ابعاد چاه گرمایی مورد استفاده در آزمایشات

در دستگاه مورد آزمایش چاه گرمایی بر روی صفحه داغ، با استفاده از یک نوع چسب سیلیکونی با رسانایی گرمایی بالا، تثبیت شده است تا گرمای ایجاد شده با کمترین مقاومت گرمایی به چاه گرمایی منتقل شود. همچنین قسمت‌های دیگر صفحه داغ به خوبی ایزوله شده است تا از هدر رفت گرما به محیط جلوگیری شود و تمامی توان الکتریکی

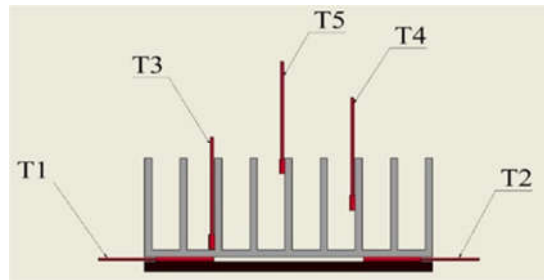
است که افزایش دما با جذب گرمای محسوس اتفاق می‌افتد. افزایش دما با یک شیب تند نسبت به مرحله قبل، شروع می‌شود تا به دمای بحرانی برسد. در این مرحله برد خاموش شده و مرحله سرمایش آغاز می‌شود. در ادامه این نمودار، فرایند سرمایش به تصویر کشیده شده است. منطقه IV مربوط به سرمایش محسوس است، منطقه V که منطقه انجماد است و در آن دفع گرما به صورت سرمایش نهان اتفاق می‌افتد و در نهایت منطقه VI که سیستم با سرمایش محسوس تا دمای محیط خنک می‌شود.

شکل ۵ رفتار چاه گرمایی بدون PCM و با حضور PCM را نشان می‌دهد. در این آزمایش، دمای بحرانی ۸۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده و زمان گرمایش ۴۵ دقیقه است. همانطور که در شکل مشخص است، برای حالت اول که چاه گرمایی فاقد PCM است، دما با شیب تندی رو به افزایش است و پس از ۱۷۰۰ ثانیه، برای توان ۴ وات دما به ۷۳ درجه سلسیوس و برای توان ۵ وات به ۸۵ درجه سلسیوس می‌رسد و پس از



شکل ۴ - تاریخچه دما-زمان برود برای گرمایش و سرمایش PCM در توان ۴ وات

آن با شیب تقریباً ثابتی حرکت می‌کند. در مرحله دوم، چاه گرمایی با PCM (کسر حجمی ۱۱٪) پر شده و مانند قبل، گرمادهی به سیستم در توان ۴ و ۵ وات انجام می‌شود. در توان ۴ وات پس از گذشت حدود ۸۰۰ ثانیه از شروع آزمایش، ذوب PCM شروع می‌شود و فرایند ذوب تا ۲۰۰۰ ثانیه ادامه پیدا می‌کند. یعنی در حدود ۲۰ دقیقه منطقه دما ثابت ایجاد می‌شود که این پدیده به میزان قابل توجهی زمان عملیاتی برد الکترونیکی را بالا می‌برد و قابلیت کار برای مدت زمان طولانی‌تر و در شرایط ایمن را به آن می‌دهد. در نهایت پس از ذوب کامل PCM و افزایش مجدد دما، در زمان ۲۸۶۰ ثانیه دمای ۷۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. در صورتی که همین دما برای حالت اول در زمان ۱۲۷۰ ثانیه ایجاد می‌شود. به طور مشابه برای توان ۵ وات پس از گذشت حدود ۴۰۰ ثانیه از شروع آزمایش، ذوب PCM شروع می‌شود و فرایند ذوب تا ۱۱۰۰ ثانیه ادامه پیدا می‌کند. در این حالت، با توجه به توان بالاتر اعمال شده به PCM سرعت ذوب افزایش یافته و ضمن کوتاه‌تر شدن بازه ذوب، دما نیز با شیب ملایمی تغییر می‌کند. در واقع می‌توان مشاهده کرد که در فاز گرمایش، هنگامی که توان بیشتری به سیستم اعمال شود، ذوب زودتر آغاز و PCM با سرعت بیشتری ذوب شده، محدوده دما ثابت کمتر شده و شروع ذوب به دمای بالاتری انتقال پیدا کرده است. برای فاز سرمایش نیز مشاهده می‌شود که در توان ۴



شکل ۳- محل قرار گیری ترموکوپل‌ها در چاه گرمایی

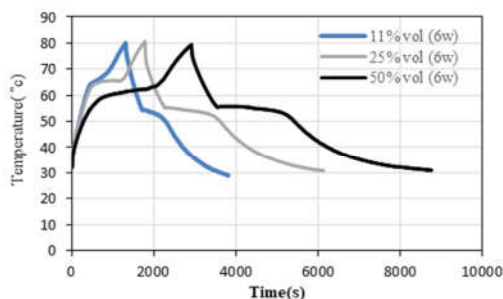
دمای اندازه گیری شده توسط ترموکوپل‌ها با استفاده از یک دستگاه ثبت داده (MultiCon-Simex- CMC ۹۹) با توانایی ثبت اطلاعات هر ۱ ثانیه یکبار، ذخیره و به رایانه ارسال می‌شود. همچنین توسط یک منبع تغذیه (Mastech DC Power Supply ۲۰ V, ۳۰ A) با محدوده خطای ۱٪ برای ولتاژ و ۲٪ برای جریان، توان‌های مختلفی در محدوده ۴ تا ۱۸ وات ایجاد و به سیستم اعمال شد.

## ۲-۲- آنالیز خطا

به منظور تکرار پذیری آزمایشات و تخمین خطای اندازه‌گیری، آزمایشات با سه بار تکرار برای توان‌های مختلفی از چاه گرمایی انجام شد و سپس با استفاده از انحراف معیار استاندارد، میزان عدم قطعیت داده‌ها محاسبه گردید و میله‌های خطا (Error bar) رسم شد. در شکل ۵ به عنوان نمونه برای حالت چاه گرمایی بدون PCM و با PCM در توان ۵ وات ارائه شده است. با توجه به اینکه تعداد داده‌ها در هر نمودار بسیار زیاد است، به منظور جلوگیری از شلوغی و درهم رفتگی شکل، میله‌های خطا فقط برای تعداد محدودی از داده‌ها رسم گردید. با توجه به میله‌های خطای نشان داده شده (متوسط انحراف معیار ۰/۵۴٪ برای حالت بدون PCM و ۰/۶۳٪ برای حالت با PCM) و مقایسه بازه میله‌های خطا با تغییرات ناشی از توان ۴ و ۵ وات می‌توان دید، تغییرات ایجاد شده در نمودارها با پارامتر توان، از محدوده خطا خارج و معنا دار است.

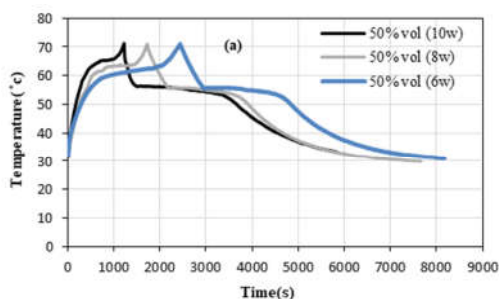
## ۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی دقیق رفتار ذوب و انجماد PCM با زمان، تغییرات دما-زمان آن بررسی و در شکل ۴ ترسیم گردید و به ۶ منطقه تقسیم‌بندی شد. این منحنی در توان ۴ وات بدست آمده است. منطقه I مربوط به گرمای محسوس حالت جامد PCM است که از دمای محیط تا دمای ذوب PCM ادامه می‌یابد. در منطقه II، ذوب PCM در دمای تغییر فاز رخ می‌دهد و دما در مدت زمان ذوب در دمای ذوب (۶۱ درجه سلسیوس) تقریباً ثابت می‌ماند. گرمای تولید شده در صفحه داغ در ناحیه به عنوان گرمای نهان جذب می‌شود. بالا بودن میزان گرمای نهان استناریک اسید (۱۹۱,۴ kg/k) باعث ایجاد تاخیر در رسیدن به یک دمای بیشینه می‌شود که به عنوان یک مزیت محسوب می‌شود و باعث می‌شود قطعه الکترونیکی برای مدت زمان طولانی‌تر و در شرایط ایمن‌تر کار کند. منطقه III مربوط به فرایند پسا ذوب (post melting)

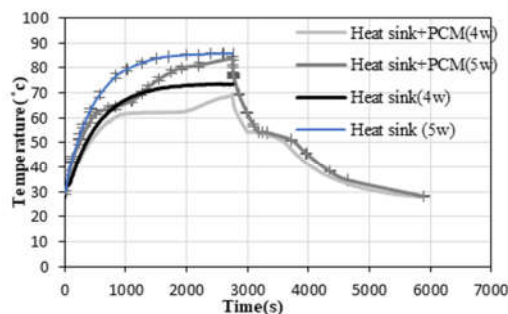


شکل ۶ - بررسی عملکرد چاه گرمایی حاوی PCM در تغییرات دمای برد در کسر حجمی‌های متفاوت از PCM در توان ۶ وات

طبق بررسی‌های صورت گرفته [۲۸]، مشخص شده است که تغییرات میزان توان خصوصا در مقادیر بالاتر، بر رفتار چاه گرمایی بسیار تاثیر گذار است. بنابراین در ادامه توان ۸ و ۱۰ وات با دو کسر حجمی ۲۵ و ۵۰ درصد از PCM مورد بررسی قرار گرفت و با توان ۶ وات مقایسه گردید. در شکل ۷ دیده می‌شود که در هر دو نمودار (a) و (b) با افزایش توان، طول محدوده ذوب PCM کاهش پیدا کرده و شروع ذوب به دمای بالاتری انتقال پیدا کرده است که می‌تواند بدلیل مقاومت گرمایی بین چاه گرمایی و صفحه داغ برد و نیز هدایت گرمایی کم PCM‌های آلی باشد که سبب می‌شود گرما با سرعت منتقل نشود و باعث تمرکز گرما و افزایش دما گردد. در واقع با افزایش توان ورودی، جذب انرژی در PCM سریع‌تر اتفاق می‌افتد و به همین دلیل سرعت فرایند ذوب افزایش می‌یابد و طول محدوده ذوب کمتر می‌شود. همچنین طول ناحیه دما ثابت برای نمودار (a) بیشتر از نمودار (b) است زیرا مقدار بیشتری از PCM استفاده شده است. با دقت در نمودارها مشخص است که تا قبل از ذوب PCM، نمودارها فاصله چندانی با یکدیگر ندارند اما به محض اینکه فرایند ذوب PCM تمام می‌شود، نمودارها فاصله زیادی با یکدیگر پیدا می‌کنند. علت وقوع این پدیده به این خاطر است که پس از ذوب کامل PCM، توان ورودی صرف افزایش دمای چاه گرمایی شده و در توان بالاتر سرعت این افزایش بیشتر خواهد بود.



وات به علت کمتر بودن دمای اوج، شروع فرایند خنک شدن و رسیدن به منطقه انجماد PCM سریع‌تر اتفاق افتاده است اما طول محدوده دما ثابت در این حالت تفاوت چندانی با توان ۵ وات ندارد. همچنین در هر دو توان ۴ و ۵ وات، خنک شدن از طریق فرایند جابجایی طبیعی اتفاق افتاده است و سرعت انتقال گرما در هر دو مشابه است.



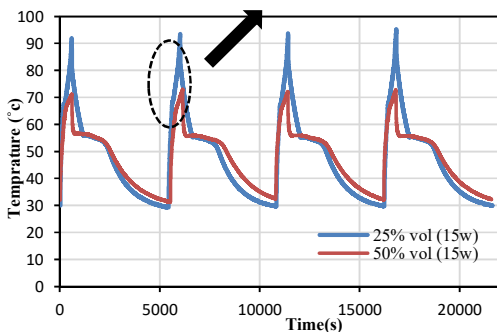
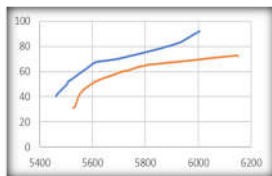
شکل ۵ - تاریخچه دما-زمان برد با چاه گرمایی بدون PCM و با PCM با کسر حجمی ۱۱٪ در توان ۴ و ۵ وات

به منظور بررسی تاثیر کسر حجمی PCM بر رفتار دمایی چاه گرمایی، در توان ۶ وات، سه کسر حجمی متفاوت ۱۱، ۲۵ و ۵۰ درصد حجمی در نظر گرفته شد و نمودار آن ترسیم گردید. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، برای کسر حجمی ۱۱٪، محدوده منطقه ذوب ۳۶۰ ثانیه است و افزایش ملایمی در شیب نمودار، در این منطقه به چشم می‌خورد. با افزایش کسر حجمی به ۲۵٪، محدوده ذوب PCM وسیع‌تر شده (۷۱۴ ثانیه) و یک ناحیه‌ی مشخص دما ثابت در این حالت مشاهده می‌شود. افزایش بیشتر کسر حجمی تا ۵۰٪، طول ناحیه ذوب را به ۱۲۳۸ ثانیه گسترش می‌دهد و زمان عملیاتی را افزایش می‌دهد. بنابراین بسته به میزان زمان عملیاتی مورد نیاز در قطعه الکترونیکی، می‌توان میزان کسر حجمی مناسبی از PCM را محاسبه و استفاده کرد. به طور مشابه در فاز سرمایش مشاهده می‌شود که هرچه کسر حجمی PCM بیشتر بوده، منطقه انجماد در نمودار نیز وسیع‌تر شده است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش کسر حجمی PCM، ظرفیت ذخیره سازی گرما توسط PCM افزایش یافته که باعث تاخیر بیشتر در زمان پاسخگویی به افزایش دمای برد می‌شود. همچنین در حین ذوب PCM، به دلیل آنکه فرایند ذوب PCM در نقطه ذوب نسبتاً ثابتی انجام می‌شود، دمای محلی می‌تواند برای مدت معینی ثابت نگه داشته شود، که این بستگی به حجم PCM در حفره‌های چاه گرمایی دارد. برای حجم PCM بیشتر، مدت دمای ثابت طولانی‌تر می‌شود.

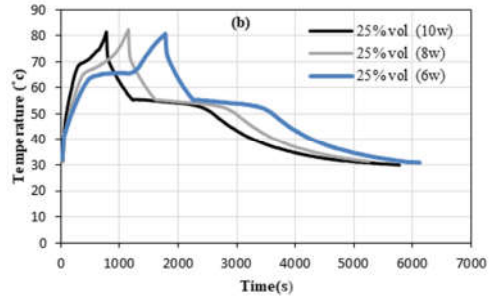
در شکل ۶، افزایش دمای منطقه ذوب در درصدحجمی‌های پایین از PCM، متاثر از مقاومت تماسی گرمایی بین چاه و صفحه داغ می‌باشد که با افزایش کسر حجمی PCM تا ۵۰ درصد و افزایش وزن مجموعه و فشار اعمال شده به سطح سبب کاهش نسبی مقاومت تماسی و در نتیجه نزدیک شدن دمای منطقه ذوب به دمای ذوب استتاریک اسید شده است.

بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ را برای شرایط مناسب عملکرد بُرد انتخاب کرد. برای مقایسه بهتر، قسمتی از نمودار که منطقه ذوب را در بر می‌گیرد بزرگنمایی شده است. در حالت بزرگنمایی مشاهده می‌شود که به طور مثال برای رسیدن به دمای ۷۰ درجه سلسیوس، در کسر حجمی ۲۵ و ۵۰ درصد، زمان به ترتیب ۵۶۰۰ ثانیه و ۵۸۵۰ ثانیه می‌باشد که به وضوح بیان می‌دارد، کسر حجمی بیشتر، باعث کندی شیب افزایش دما و طولانی‌تر شدن زمان عملیاتی در شرایط ایمن می‌شود. نکته قابل توجهی که از نمودار ۸ می‌توان دریافت اینست که تاریخچه‌ی دمایی یکسان در چرخه‌های متوالی نشان می‌دهد که استتاریک اسید به عنوان PCM انتخاب شده دارای پایداری گرمایی مناسبی بوده و در چرخه‌های متوالی عملکرد آن دچار نقصان نشده و خواص گرمایی خود را حفظ کرده است.

به‌طور مشابه این فرایند برای توان ۱۰ وات و در کسر حجمی ۲۵ و ۵۰ درصد در سه چرخه تکرار شد. در شکل ۹ دیده می‌شود که دمای هر دو منحنی در تمام سیکل‌ها زیر ۷۰ درجه سلسیوس باقی مانده است و تا دمای بحرانی ۸۵ درجه سلسیوس، اختلاف قابل توجهی دارد. علاوه بر آن، رفتار دمایی هر دو نمودار بسیار به یکدیگر نزدیک و همپوشانی زیادی دارد. این همپوشانی بیان می‌دارد که در توان‌های پایین‌تر درصد حجمی کمتری از PCM، بخوبی می‌تواند کنترل دمای برد را در زیر دمای بحرانی انجام دهد اما در توان‌های بالاتر نیاز به مقدار PCM بیشتری است (شکل ۸). بنابراین کسر حجمی PCM استفاده شده در چاه گرمایی برای خنک سازی برد الکترونیکی بسته به توان بُرد یک مقدار بهینه دارد و بیشتر از آن، بهبودی در رفتار دمایی ایجاد نمی‌کند. توجه به این میزان بهینه در مصرف مقدار PCM و ملاحظات اقتصادی بسیار مهم است.



شکل ۸ - تغییرات دمای برد با زمان در ۴ چرخه متوالی در توان ۱۵ وات و در دو کسر حجمی متفاوت از PCM



شکل ۷ - عملکرد چاه گرمایی حاوی PCM در تغییرات دمای برد در توان‌های مختلف (a) کسر حجمی ۵۰٪ (b) کسر حجمی ۲۵٪

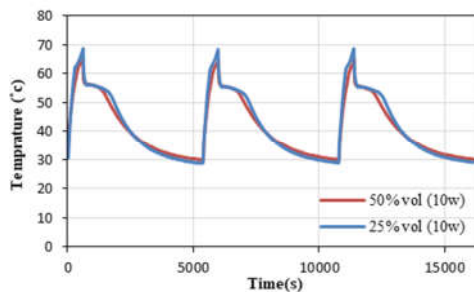
با توجه به شکل ۷، میزان افزایش در زمان عملیاتی امن با توجه به درصد حجمی PCM در جدول ۳ گزارش شده است. در این جدول، درصد افزایش زمان دوره ذوب برای کسر حجمی های ۲۵ و ۵۰ درصد، نسبت به کسر حجمی ۲۵ درصد محاسبه شده است.

جدول ۳ - طول دوره ذوب PCM در دو کسر حجمی متفاوت

| درصد افزایش زمان دوره ذوب | درصد حجمی  |           |
|---------------------------|------------|-----------|
|                           | ۵۰٪        | ۲۵٪       |
| ۶۲٪                       | ۱۲۳۰ ثانیه | ۷۵۹ ثانیه |
| ۸۲٪                       | ۶۴۶ ثانیه  | ۳۵۵ ثانیه |
| ۸۵٪                       | ۴۴۶ ثانیه  | ۲۴۱ ثانیه |

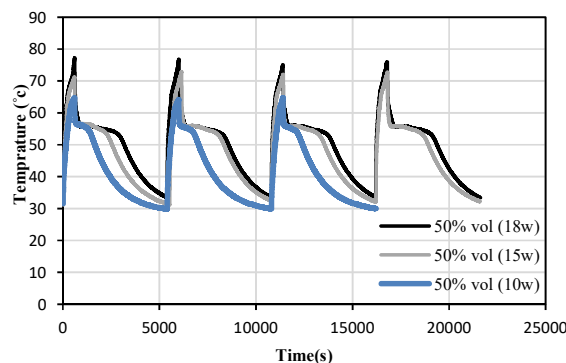
در بیشتر تجهیزات الکترونیکی، قطعه مورد نظر بطور متناوب دوره‌های روشن-خاموش مشخصی را در بازه زمانی تعریف شده طی می‌کند. به منظور شبیه سازی رفتار برد الکترونیکی به حالت واقعی‌تر، آزمایشاتی در حالت بارگذاری گرمایی متناوب انجام گرفت. در این پژوهش، از نمونه واقعی یک برد الکترونیکی در تجهیزات فضایی ایده گرفته شد، به گونه‌ای که صفحه داغ در توان مورد نظر ۱۰ دقیقه روشن و ۸۰ دقیقه خاموش می‌شود. در طول ۱۰ دقیقه فرایند گرمایش انجام می‌شود و بعد از این مدت با خاموش کردن منبع تغذیه، فرایند سرمایش از طریق جابجایی طبیعی انجام شده و در طول ۸۰ دقیقه چاه گرمایی تا خنک می‌شود و مجدد این چرخه تکرار می‌گردد. جهت بررسی عملکرد چاه گرمایی حاوی استتاریک اسید، فرایند ذکر شده برای چند چرخه متوالی و در توان‌های بالا (۱۰، ۱۵ و ۱۸ وات) تکرار شد و نتایج تغییرات دما با زمان در شکل ۸ رسم شد.

با مشاهده شکل ۸ دیده می‌شود که دمای پیک در توان ۱۵ وات و در ۱۰ دقیقه گرمایش، برای کسر حجمی ۲۵٪ از PCM، حدود ۲۰ درجه سلسیوس با کسر حجمی ۵۰٪ اختلاف دارد که ناشی از اختلاف مقدار PCM استفاده شده است. هرچه درصد حجمی PCM بیشتر باشد مقدار انرژی گرمایی بیشتری را در طول مدت ذوب خود جذب می‌کند. لذا همانطور که نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد برای توان ۱۵ وات و در عملکرد چرخه ای بُرد، مقدار کسر حجمی ۲۵٪ از PCM نمی‌تواند دمای بُرد را در زیر دمای بحرانی کنترل کند. لذا برای این منظور باید از درصدهای حجمی بیشتری از PCM استفاده کرد. اما در مورد ۵۰٪ حجمی PCM دمای بُرد حدود ۱۵ درجه زیر دمای بحرانی (۸۵ درجه سلسیوس) کنترل شده است. بنابراین می‌توان مقدار بهینه ای از PCM



شکل ۹- تغییرات دمای برد با زمان در ۳ چرخه متوالی در توان ۱۰ وات و در دو کسر حجمی متفاوت از PCM

برای مقایسه عملکرد رفتار چاه گرمایی در توان‌های بالا، تاریخچه دما-زمان در سه توان ۱۰، ۱۵ و ۱۸ وات برای چند چرخه متوالی و در کسر حجمی ثابت ۵۰ درصد، در کنار هم ترسیم گردید. با توجه به شکل ۱۰ دیده می‌شود که رفتار نمودار در توان ۱۰ وات در تمامی چرخه‌ها، هم در فاز گرمایش و هم در فاز سرمایش، فاصله دمایی زیادی با نمودارهای مربوط به توان ۱۵ و ۱۸ وات دارد. با توجه به اینکه میزان PCM استفاده شده در این سری از آزمایشات یکسان و توان‌ها متفاوت است، لذا انتظار می‌رود در توان پایین‌تر (۱۰ وات)، مقدار انرژی گرمایی کمتری به واحد جرم PCM منتقل شود و در نتیجه دمای آن پس از ذوب چندان افزایش پیدا نکند. در حالیکه برای توان‌های بالاتر (۱۵ و ۱۸ وات) با همان میزان PCM (۵۰ درصد)، میزان تولید انرژی در بُرد بیشتر و افزایش دما هم بیشتر خواهد بود. این روند در سیکل سرمایش به صورت معکوس مشاهده می‌شود یعنی در توان پایین‌تر نرخ سرمایش سریع‌تر است.



شکل ۱۰ - تغییرات دمای بُرد با زمان در سیکل‌های متوالی، در کسر حجمی ۵۰ درصد از PCM و در توان‌های مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر خنک‌سازی برد الکترونیکی شبیه‌سازی شده با بُردهای الکترونیکی در کاربردهای فضایی، با استفاده از چاه گرمایی حاوی استئاریک اسید به عنوان PCM به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با حالت بدون استفاده از PCM مقایسه گردید. نتایج نشان داد که حضور PCM در چاه گرمایی بطور قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود رفتار دمایی و کاهش دمای آن تا زیر دمای بحرانی (۸۵ درجه سلسیوس) می‌شود و از این نظر عملکرد ایمنی را برای سیستم فراهم

می‌آورد. استفاده از PCM با کسر حجمی‌های ۱۱، ۲۵ و ۵۰ درصد و در توان ۶ وات نشان داد که با افزایش کسر حجمی، به دلیل افزایش ظرفیت جذب انرژی بیشتر، طول دوره ذوب بیشتر و بدنبال آن نرخ ذوب آهسته‌تر می‌شود و زمان عملیاتی سیستم در شرایط مناسب دمایی را افزایش می‌دهد. در این حالت طول محدوده ذوب برای کسر حجمی ۱۱، ۲۵ و ۵۰ درصد به ترتیب ۳۶۰، ۷۱۴ و ۱۲۳۸ ثانیه بدست آمد. همچنین بررسی رفتار دمایی چاه گرمایی در دو کسر حجمی ۲۵ و ۵۰ درصد نشان داد که درصد افزایش زمان دوره ذوب کسر حجمی ۵۰ درصد نسبت به کسر حجمی ۲۵ درصد برای سه توان ۸، ۶ و ۱۰ وات به ترتیب ۶۲، ۸۲ و ۸۵ درصد می‌باشد.

آزمایشات چرخه‌های متوالی گرمایش-سرمایش با برنامه زمانی ۱۰ دقیقه گرمایش و ۸۰ دقیقه سرمایش، نشان داد که استئاریک اسید به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده آلی، پایداری گرمایی مناسب و عملکرد خوبی در کنترل دمای برد دارد. نتایج آزمایشات چرخه‌های متوالی نشان داد، بیشینه دمای بُرد در توان ۱۵ وات و بعد از ۱۰ دقیقه گرمایش، برای کسر حجمی ۲۵٪ در دمای ۹۳ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد که از دمای بحرانی برد فراتر رفته است، در حالیکه برای کسر حجمی ۵۰٪ از PCM این دمای بیشینه در ۷۱ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد و فاصله زیادی تا دمای بحرانی دارد. این تفاوت زیاد در دمای پیک ناشی از اختلاف مقدار PCM استفاده شده است که می‌تواند انرژی گرمایی بیشتری را در طول مدت ذوب خود جذب کند. لذا با توجه به توان اعمالی به بُرد می‌توان میزان بهینه‌ای برای درصد حجمی PCM انتخاب کرد تا ضمن کنترل دمای برد بتواند صرفه اقتصادی را نیز مد نظر قرار دهد. مقایسه عملکرد چاه گرمایی در توان‌های مختلف و با درصد حجمی PCM یکسان، نشان داد، حساسیت عملکرد چاه گرمایی به درصد حجمی PCM در توان‌های بالا بسیار بیشتر از توان‌های پایین است. بطوریکه در توان ۱۵ وات اختلاف بیشینه دماها به حدود ۲۰ درجه سلسیوس می‌رسد اما برای توان ۱۰ وات کمتر از ۵ درجه سلسیوس است.

#### ۵- نمادها

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| گرمای ویژه در فشار ثابت $[J/(kg.K)]$ | $C_p$     |
| رسانایی گرمایی $[W/(m.K)]$           | $k$       |
| گرمای نهان ذوب $(kJ/kg)$             | $L$       |
| حجم چاه گرمایی $(m^3)$               | $V_s$     |
| حجم پره‌ها $(m^3)$                   | $V_f$     |
| دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده        | $T_m$     |
| چگالی $(kg/m^3)$                     | $\rho$    |
| حجم مواد تغییر فاز دهنده $(m^3)$     | $V_{PCM}$ |
| کسر حجمی مواد تغییر فاز دهنده        | $\psi$    |

#### مراجع

- [1] Murshed S. S., & De Castro C. N., A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.78, pp. 821-833, 2017.
- [2] Sahoo S. K., Das M. K., & Rath P., Application of TCE-PCM



- pp. 143-155, 2017.
- [21] Arshad A., Ali H. M., Yan W.-M., Hussein A. K., & Ahmadelouydarab M., An experimental study of enhanced heat sinks for thermal management using n-icosane as phase change material. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 52-66., 2018.
- [22] Ali H. M., Arshad A., Jabbar M., & Verdin P. G., Thermal management of electronics devices with PCMs filled pin-fin heat sinks: a comparison. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.117, pp. 1199-1204, 2018.
- [23] Ashraf M. J., Ali H. M., Usman H., & Arshad A., 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.
- [24] Baby R., & Balaji C. a., Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 1642-1649, 2012.
- [25] 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.
- [26] Baby R., & Balaji C. b., Thermal management of electronics using phase change material based pin fin heat sinks. *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series*, 2012.
- [27] 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.
- [28] Baby R., & Balaji C., Thermal performance of a PCM heat sink under different heat loads: an experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 79, pp. 240-249, 2014.
- [29] Srikanth R., Nemani P., & Balaji C., Multi-objective geometric optimization of a PCM based matrix type composite heat sink. *Applied energy*, Vol. 156, pp. 703-714, 2015.
- [30] Hu J., Guo T., Zhu Y., Hu R., Luo X., & Cheng T., Effect of melting temperature and amount of the phase change material (PCM) on thermal performance of hybrid heat sinks, *Paper presented at the 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2014.
- [31] Sari A., Kaygusuz K., Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material. *Solar Energy*, Vol.71, No.6, pp. 365-376, 2001.
- [32] Chen Z., Cao L., Shan F., Fang G., Preparation and characteristics of microencapsulated stearic acid as composite thermal energy storage material in buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 6, pp. 469-474, 2013.
- [33] Sharma A., Sharma S., & Buddhi D., Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications. *Energy Conversion and Management*. Vol. 43, No. 14, pp. 1923-1930, 2002.
- [34] Sharma S., Buddhi D., & Sawhney R., Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials. *Solar Energy*, Vol. 66, No. 6, pp. 483-490, 1999.
- [35] Sari A., Kaygusuz K., Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling. *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 6, pp. 939-948, 2003.
- based heat sinks for cooling of electronic components: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 550-582, 2016.
- [3] Yang X.-H., Tan S.-C., He Z.-Z., Zhou Y.-X., & Liu J., Evaluation and optimization of low melting point metal PCM heat sink against ultra-high thermal shock. *Applied Thermal Engineering*, Vol.119, pp. 34-41, 2017.
- [۴] گجکاران آ.، جدا ف.، طراحی و بهینه‌سازی یکپارچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص ۲۳۵-۲۴۴، ۱۳۹۸.
- [۵] اشرفی م.، محمدیون ح.، دیبایی م.ح.، 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.
- [6] Sharma A., Tyagi V. V., Chen C., & Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol.13, No. 2, pp. 318-3., 2009.
- [۷] معین جهرمی م.، رحمانیان س.، برزگرلو کوهی ص.، تحلیل اثر هندسه جاذب حرارتی با بکارگیری میردهای نانوسیال و مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله بر عملکردهای پیل های فتوولتائیک-حرارتی، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۹.
- [8] 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.
- [9] Wei L. C., & Malen J. A., Amplified charge and discharge rates in phase change materials for energy storage using spatially-enhanced thermal conductivity. *Applied energy*, Vol. 181, pp. 224-231, 2016.
- [10] 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.
- [11] Hosseinizadeh 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, pp. 3827-3838, 2011.
- [12] 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, pp. 1833-1844, 2006.
- [13] Saha S., Srinivasan K., & Dutta P. Studies on optimum distribution of fins in heat sinks filled with phase change materials. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 130, No. 3, 2008.
- [14] Gharbi S., Harmand S., & Jabrallah S. B., Experimental comparison between different configurations of PCM based heat sinks for cooling electronic components. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 87, pp. 454-462, 2015.
- [15] 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.
- [16] Mahrous A., Thermal performance of PCM based heat sinks. *Int J Mech Eng*, Vol. 2, No. 4, 2013.
- [17] Kalbasi R., & Salimpour M. R., Constructal design of horizontal fins to improve the performance of phase change material rectangular enclosures. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, pp. 234-244, 2015.
- [18] 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.
- [19] Ali H. M., & Arshad A., Experimental investigation of n-icosane based circular pin-fin heat sinks for passive cooling of electronic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 112, pp.649-661, 2017.
- [20] Arshad A., Ali H. M., Ali M., & Manzoor S., Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. *Applied Thermal Engineering*, Vol.112,