

## Investigation of the Thermal Energy Storage Potential of Wood Using Capric Acid as a Phase Change Material

Siroos Habibzade<sup>1</sup>, Behbood Mohebbi<sup>2\*</sup>, Seyed Mojtaba Sadrameli<sup>3</sup>,  
Cemil Alkan<sup>4</sup>

1- Ph.D Student in Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2- Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

[mohebbiyb@modares.ac.ir](mailto:mohebbiyb@modares.ac.ir)

3- Professor, Department of Process Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Professor, Department of Physical Chemistry, Faculty of Arts and Sciences, Gaziosmanpaşa University, Tokat, Turkey

Received: November 2025

Accepted: May 2026

### Abstract

**Problem definition and objectives:** In recent years, optimizing energy consumption in buildings has become one of the main research priorities in the fields of building engineering and energy. The integration of phase change materials into building materials and components such as walls and ceilings has gained significant attention as an innovative approach to enhance thermal energy efficiency. By increasing thermal mass and thermal inertia, these materials considerably enhance the heat-storage performance of building elements, particularly in lightweight structures that inherently have limited energy-storage capacity. Capric acid, as one of the most widely used phase change materials, has a melting point close to the human thermal comfort range, making it a suitable candidate for thermal energy storage in indoor building environments. Wood and wood-based products are extensively used in interior building components due to their favorable mechanical properties and environmental benefits. However, their natural thermal energy storage capacity is relatively low. The main objective of this research is to investigate the application of capric acid as a phase change material impregnated into a poplar wood matrix, aimed at enhancing the thermal energy storage performance of wood-phase change material composite systems.

**Methodology:** To investigate the thermal energy storage performance, poplar wood samples were first oven-dried at 103 °C for 24 hours and then weighed. Subsequently, the dried samples were placed in a suitable container and transferred to a vacuum drying oven to evacuate air from the cellular pores of the wood. A solution of capric acid was then added to the samples, and the vacuum process was repeated to ensure penetration of the phase change material into the wood structure. Finally, the impregnated samples were dried under ambient conditions for 24 hours until constant mass was achieved. In this study, Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis was employed to evaluate the thermal capacity and phase-change behavior of the samples at different temperatures. Thermal cycling tests were conducted using a Cycling Test apparatus under

controlled temperature conditions. Additionally, the surface temperature distribution of the samples was recorded and analyzed using an infrared thermal camera.

**Results:** The DSC analysis showed that the wood/capric acid composite samples had a melting and freezing temperature of 28.2 °C and 23.9 °C, respectively. The thermal energy storage capacity of the samples was reduced by approximately 55% compared to pure capric acid which can be explained by several factors, the confinement of the phase change material within the wood pores, the low thermal mass of the wood and capillary interactions between capric acid and the cell walls of the wood. Furthermore, thermal cycling tests demonstrated that the wood samples containing capric acid exhibited a significant delay in temperature fluctuations compared to the samples without phase change material, allowing for improved energy efficiency and reduced temperature variations in indoor environments. Infrared thermal imaging also confirmed that the samples containing capric acid had higher surface temperatures and distributed heat more uniformly.

**Conclusion:** This research investigated the application of capric acid as a phase change material in poplar wood to enhance thermal energy storage performance in building applications. The results demonstrate that impregnating wood with capric acid significantly increases its thermal energy storage capacity and effectively reduces temperature fluctuations. Moreover, the wood-phase change material composites exhibited improved thermal behavior, including a more uniform heat distribution. This approach can contribute to reduced energy consumption for heating and cooling while enhancing indoor thermal comfort for occupants.

**Keywords:** Poplar wood, Phase Change Materials (PCM), Capric Acid, Thermal Energy Storage, Thermal Cycling

## بررسی پتانسیل ذخیره انرژی گرمایی چوب با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده اسید کاپریک

سیروس حبیب‌زاده<sup>۱</sup>، بهبود محبی<sup>۲\*</sup>، سید مجتبی صدرعاملی<sup>۳</sup>، جمیل آلکان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران. رایانامه: [mohebyb@modares.ac.ir](mailto:mohebyb@modares.ac.ir)

۳- استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- استاد گروه مهندسی شیمی فیزیک، دانشکده علوم هنر، دانشگاه قاضی عثمان پاشا، توکات، ترکیه

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۵

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از محورهای اصلی پژوهش در حوزه مهندسی ساختمان و انرژی تبدیل شده است. بهره‌گیری از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در ساخت مصالح و اجزای ساختمانی نظیر دیوارها و سقف‌ها، به‌عنوان رویکرد نوین برای افزایش بهره‌وری انرژی گرمایی، مورد توجه قرار گرفته است. این مواد با افزایش جرم و اینرسی حرارتی، به‌ویژه در ساختمان‌های سبک‌وزن با ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی محدود، سبب بهبود عملکرد ذخیره حرارتی اجزای ساختمان می‌شوند. اسید کاپریک، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مواد تغییر فاز دهنده، با دمای نقطه ذوب نزدیک به محدوده آسایش حرارتی، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در محیط‌های داخلی ساختمان‌ها می‌باشد. چوب و فرآورده‌های چوبی، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و زیست‌محیطی مطلوب، به‌طور گسترده در اجزای داخلی ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، اما ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی آن‌ها به‌طور طبیعی پایین است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی کاربرد اسید کاپریک به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده در زمینه چوب صنوبر با هدف ارتقای عملکرد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در سیستم‌های کامپوزیتی چوب-ماده تغییر فاز دهنده است.

**مواد و روش‌ها:** برای آزمون ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، نمونه‌های چوب صنوبر پس از خشک‌کردن در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت، توزین شدند. در مرحله بعد، این نمونه‌ها در ظرف مناسبی قرار گرفته و به دستگاه خشک‌کن خلاء منتقل شدند تا هوا از حفرات سلولی چوب خارج گردد. سپس محلول اسید کاپریک به نمونه‌ها اضافه و فرآیند خلاء مجدداً انجام شد تا محلول به درون ساختار چوب نفوذ کند. در نهایت، نمونه‌های اشباع شده با ترازوی دیجیتال توزین شدند. در این مطالعه، آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) برای بررسی تغییرات ظرفیت حرارتی نمونه‌ها در دماهای مختلف به‌کار گرفته شد. آزمون چرخه حرارتی با استفاده از اتاقک مخصوص تحت شرایط دمایی کنترل‌شده ارزیابی شدند. همچنین، توزیع دمای سطح نمونه‌ها با استفاده از دوربین قمری ثبت و تحلیل گردید.

**نتایج:** نتایج آزمون DSC نشان داد که دمای نقطه ذوب و انجماد نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک به ترتیب ۲۸/۲ و ۲۳/۹ درجه سانتی‌گراد است، ظرفیت ذخیره انرژی گرمایی نمونه‌ها نسبت به اسید کاپریک خالص ۵۵ درصد کاهش یافته که می‌توان به دلایلی از جمله محصورشدن مواد تغییر فازی در منافذ چوب، جرم حرارتی پایین چوب و اثر نیروی موینگی بین اسید کاپریک با دیواره‌های سلولی چوب اشاره نمود. همچنین، آزمون‌های چرخه حرارتی نشان دادند که نمونه‌های چوبی حاوی اسید کاپریک تأخیر قابل‌توجهی در تغییرات دما نسبت به نمونه‌های بدون PCM دارند، که این امر بهبود کارایی انرژی و کاهش نوسانات دمایی در محیط‌های داخلی را امکان‌پذیر می‌سازد. تصویربرداری حرارتی مادون قرمز نیز تأیید کرد که نمونه‌های حاوی اسید کاپریک دمای سطحی بالاتری دارند و گرما را به‌طور یکنواخت‌تر توزیع می‌کنند.

**نتیجه گیری:** این تحقیق به بررسی کاربرد اسید کاپریک به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در چوب صنوبر برای بهینه سازی ذخیره سازی انرژی حرارتی در ساختمان ها پرداخته است. نتایج نشان می دهد که اشباع چوب با اسید کاپریک ظرفیت ذخیره سازی انرژی حرارتی را افزایش و نوسانات دمایی را کاهش می دهد. همچنین، رفتار گرمایی نمونه های چوبی حاوی PCM بهبود یافته و توزیع حرارتی یکنواخت تری را نشان می دهد. به طور کلی، استفاده از این ماده می تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی ساکنان کمک کند.

**واژه های کلیدی:** چوب صنوبر، مواد تغییر فاز دهنده، اسید کاپریک، ذخیره سازی انرژی گرمایی، چرخه حرارتی.

## مقدمه

رشد روزافزون آلاینده های محیط زیست همراه با افزایش قیمت سوخت، به عنوان دو عامل کلیدی، موجب افزایش توجه جامعه به استفاده از انرژی های تجدید پذیر شده اند. ساختمان ها به عنوان یکی از بزرگ ترین مصرف کنندگان انرژی در سطح جهان شناخته می شوند؛ به طوری که تقریباً ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی در این بخش صرف می گردد. از این میزان، حدود ۴۱ درصد انرژی مصرفی به فرآیندهای سرمایش و گرمایش فضای داخلی ساختمان اختصاص دارد [۱]. پژوهشگران بسیاری در سراسر جهان به مطالعه و بررسی منابع تجدید پذیر و روش های نوین بهره برداری از آن ها پرداخته اند. یکی از موضوعات با اهمیت انرژی تجدید پذیر، توسعه و بهینه سازی وسایل ذخیره سازی این انرژی ها است. در حال حاضر، ذخیره سازی انرژی به صورت کارآمد و با قابلیت تبدیل و آزاد سازی در زمان و حالت مورد نیاز، از مهم ترین چالش های فناوری های نوین به شمار می رود. استفاده از مواد و روش های نوین در ذخیره سازی انرژی، موجب بهبود تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی می گردد، همچنین کارایی و قابلیت اطمینان سیستم های انرژی را افزایش داده و نقش چشمگیری در کاهش هدررفت انرژی ایفا می کند [۲].

چوب به دلیل ویژگی هایی نظیر زیبایی ظاهری، سبکی و در عین حال داشتن مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن سبک، از جایگاه ویژه ای در صنعت ساختمان برخوردار است. افزایش سریع جمعیت جهان و به تبع آن رشد تقاضا برای مصرف چوب از یک سو، و محدودیت منابع جنگلی از سوی دیگر، ضرورت استفاده بهینه و پایدار از این ماده ارزشمند را بیشتر می سازد. پیش از قرن بیستم، بسیاری از ساختمان های مسکونی و تجاری از

چوب به عنوان یکی از مواد اصلی ساخت استفاده می کردند. با وجود پیشرفت های چشمگیر در صنعت ساخت و ساز و توسعه مصالح نوین، چوب همچنان به عنوان یکی از مصالح پر کاربرد در ساختمان سازی به شمار می رود. مقاومت مناسب چوب در برابر زلزله و طوفان، در کنار تجدید پذیر بودن آن، این ماده را به گزینه ای مطلوب برای معماران و طراحان تبدیل کرده است. از این رو، چوب نه تنها در ساخت ساختمان های چوبی، بلکه به عنوان پوشش نهایی در فضاهای داخلی و خارجی ساختمان ها نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. با وجود مزایای متعدد چوب و فرآورده های چوبی، یکی از چالش های اساسی این مواد، ظرفیت حرارتی بسیار پایین آن ها است. در نتیجه، توسعه روش هایی که امکان ذخیره سازی انرژی حرارتی در چوب و مصنوعات چوبی مورد استفاده در ساختمان ها را فراهم سازد، می تواند گام موثری در بهینه سازی مصرف انرژی، به ویژه انرژی حرارتی، محسوب شود [۳].

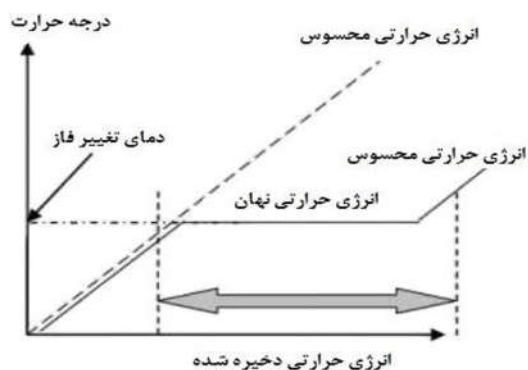
یکی از روش های مؤثر در ذخیره انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده<sup>۱</sup> است. این مواد که به عنوان مصالح هوشمند شناخته می شوند؛ می توانند به عنوان عنصر واسطه برای ذخیره سازی گرما یا سرمای نهان در ساختار چوب و فرآورده های چوبی در ساختمان به کار گرفته شوند. به صورت کلی، مواد تغییر فاز دهنده در طبیعت در سه فاز جامد، مایع و گاز وجود دارند. هنگامی که ماده ای از یک فاز به فاز دیگر تغییر حالت می دهد؛ مقدار قابل توجهی انرژی گرمایی که گرمای نهان نامیده می شود؛ جذب یا آزاد می کند. برای مثال، یک ماده جامد پس از گرم شدن و رسیدن به نقطه ذوب خود، حجم

<sup>1</sup> Phase Change Materials

جذب انرژی گرمایی در سه مرحله متمایز رخ می‌دهد. در مرحله اول، با افزایش دما، PCM انرژی حرارتی را از محیط اطراف جذب می‌کند، انرژی جذب‌شده به‌صورت گرمای محسوس<sup>۲</sup> ذخیره می‌گردد؛ به این معنا که دما به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، اما تغییر فازی رخ نمی‌دهد. مرحله دوم زمانی آغاز می‌گردد که دمای محیط به نقطه ذوب PCM می‌رسد، و PCM شروع به تغییر فاز (جامد به مایع، مایع به گاز) می‌کند. در این مرحله، PCM انرژی گرمایی را به‌عنوان گرمای نهان جذب می‌کند. در ناحیه انرژی حرارتی نهان، فرآیند تغییر فاز در حال شکل‌گیری است و در همین منطقه، انرژی گرمایی جذب شده توسط ماده ذخیره می‌شود. در این ناحیه، افزایش دما به‌طور قابل توجهی مشاهده نمی‌شود؛ زیرا تمام انرژی حرارتی جذب شده به تغییر حالت ماده اختصاص یافته است. پس از تکمیل تغییر فاز و ذوب کامل PCM، مرحله سوم آغاز می‌شود. در این مرحله، ماده به‌طور کامل به حالت مایع درآمده و مجدداً انرژی گرمایی را به‌صورت گرمای محسوس جذب می‌کند، که منجر به افزایش مجدد دما می‌گردد [۴].

اولین کاربرد مواد PCM، در پروژه‌های فضایی سازمان NASA در سال ۱۹۶۰ میلادی بود. با نزدیک شدن به پایان قرن ۲۰ میلادی این مصالح توسط ایالات متحده و به دنبال آن یک شرکت آلمانی (Rubitherm) در پانل ساختمانی و دیگر اجزای پوشش ساختمان استفاده شد.

قابل توجهی از انرژی (که گرمای نهان<sup>۱</sup> ذوب نامیده می‌شود) را جذب کرده و از حالت جامد به مایع تبدیل می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده ویژگی منحصر به فردی دارند که به آن‌ها اجازه می‌دهد حالت خود را در یک دامنه دمایی مشخص تغییر دهند به عبارت دیگر، در حین فرآیند تغییر حالت این مواد، دمای خود را برای مدت زمان معین حفظ می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که مواد PCM به عنوان ابزارهای مؤثر در ذخیره انرژی گرمایی عمل کنند. روش عملکرد این مواد به این نحو است که طی فرآیند گرم‌شدن محیط، مواد تغییر فاز به صورت موازی با محیط گرم می‌شوند تا به دمای ذوب خود (تغییر فاز) برسند. در این مرحله، اگرچه دمای محیط همچنان در حال افزایش است، دمای ماده PCM به دلیل فرآیند تغییر فاز ثابت باقی می‌ماند و در برابر افزایش دما مقاومت می‌کند. این وضعیت می‌تواند به مدت چند ساعت ادامه یابد. طی این بازه زمانی، ماده تغییر فاز دهنده مقادیر قابل توجهی از گرمای محیط را به خود جذب می‌کند؛ اما این حرارت را برای افزایش دمای خود صرف نمی‌کند. بلکه انرژی گرمایی جذب شده صرف فرآیند تغییر فاز از حالت جامد به مایع می‌شود و در همین هنگام، دمای خود و محیط اطرافش را ثابت نگه می‌دارد [۴]. روند تغییرات دمایی و جذب انرژی گرمایی مواد تغییر فاز دهنده به‌خوبی در شکل شماره ۱ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، فرآیند



شکل ۱- نمودار عملکرد PCM [۴]

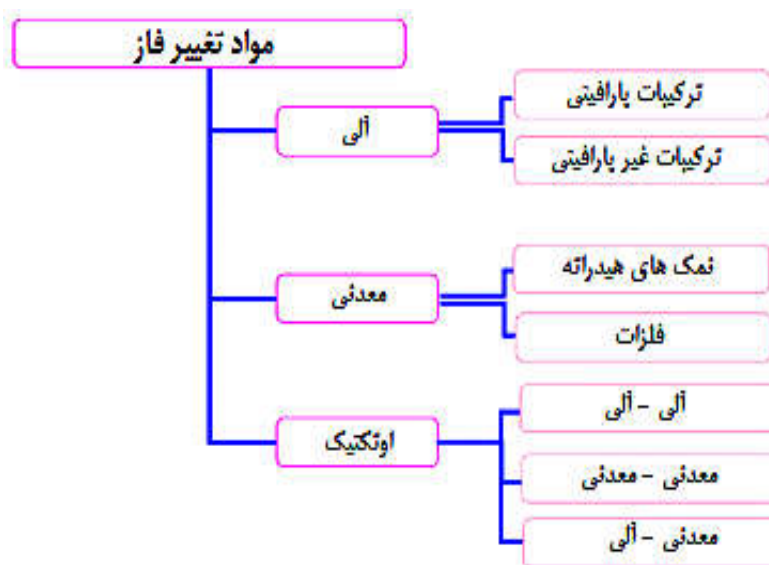
<sup>2</sup> Sensible Heat

<sup>1</sup> Latent heat

ذخیره شده در صفحات حاوی این مواد، افزایش می‌یابد [۱۲].

مواد تغییر فاز دهنده را بر اساس دمای تغییر فازشان به سه دسته اتکتیک‌ها<sup>۵</sup>، مواد آلی و معدنی تقسیم‌بندی می‌کنند. شکل شماره ۲ دسته‌بندی گروه‌های مختلف PCM ها را نشان می‌دهد. دمای تغییر فاز اتکتیک‌ها کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد و دمای تغییر فاز مواد آلی و غیرآلی بالای دمای PCM ها بین ۴۰- درجه سانتی‌گراد تا ۱۱۷ درجه سانتی‌گراد است. موادی که زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند؛ برای خنک کردن هوای اتاق مورد استفاده قرار می‌گیرند و موادی که بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند؛ برای کاهش دمای مناطقی که دما به صورت غیرمنتظره در آن جا بالا رفته باشد و جلوگیری از آتش‌سوزی و انفجار به کار می‌روند و موادی که نقطه ذوبشان ما بین این دو دما قرار دارد و برای ذخیره‌سازی انرژی‌های خورشید به کار می‌روند [۱۳].

PCM ها در صنایع مختلفی هم چون نیروگاه‌های خورشیدی و ساختمان‌ها (برای افزایش جرم حرارتی) کاربردهای فراوانی یافته‌اند. با به‌کارگیری PCM ها در ساختمان، در طول روز انرژی تابشی خورشید در اجزای مختلف ساختمان ذخیره می‌شود و با غروب خورشید و کاهش دما، این انرژی به تدریج آزاد می‌گردد و در کنترل دمای ساختمان و کاهش مصرف انرژی موثر واقع می‌شود [۵ و ۱]. از PCM در ساخت دیوار ذخیره‌ساز حرارتی<sup>۱</sup> [۶]، چند سازه چوب پلاستیک<sup>۲</sup> [۳]، پانل دیواری<sup>۳</sup> [۷]، دیوار بتنی [۹ و ۸]، سامانه گرمایش از کف [۱۰] و پانل‌های کفاف<sup>۴</sup> [۱۱] ساختمان استفاده می‌شود. بر اساس گزارش Koo و همکاران (۲۰۱۱)، اگر دمای ذوب PCM به دمای میانگین اتاق نزدیک باشد؛ مدت زمان ذخیره یا آزادسازی انرژی در صفحات حاوی این مواد افزایش می‌یابد که منجر به ایجاد تاخیر زمانی بیشتر در دمای حداکثر هوای اتاق در مقایسه با اتاقی است که PCM در آن به کار نرفته است و مقدار انرژی گرمایی



شکل ۲- گروه‌های مختلف PCM [۱۳]

<sup>5</sup> Eutectic

<sup>1</sup> Trombe Wall

<sup>2</sup> Wood Plastic Composite

<sup>3</sup> Wallboard

<sup>4</sup> Gypsum Ceiling Panels

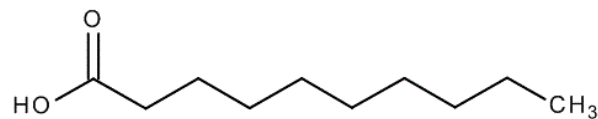
شفاف با قابلیت عبور نور تا ۶۸ درصد تحت شرایط حرارتی تولید کردند که می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای شیشه در ساختمان‌ها، ضمن حفظ انتقال نور، نقش مؤثری در ذخیره انرژی حرارتی ایفا کند [۱۶].

در این پژوهش، اسید کاپریک (دکانوئیک اسید،  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$ ) با نقطه ذوب ۳۱-۳۲ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان یک اسید چرب اشباع انتخاب شد. این ماده به‌طور طبیعی در روغن نارگیل، روغن پالم و برخی محصولات لبنی یافت می‌شود و به‌دلیل خواص ترموفیزیکی مناسب، به‌عنوان یکی از مواد مؤثر تغییر فاز دهنده در کاربردهای ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی حرارتی شناخته شده است. اسید کاپریک با ظرفیت گرمایی نهان بالایی (حدود ۱۷۰-۱۹۰ kJ/kg) و پایداری حرارتی و شیمیایی مطلوب، برای کاربرد در دماهای نزدیک به دمای محیط، مانند سیستم‌های آسایش حرارتی در ساختمان‌ها، مناسب است. علاوه بر این، غیرسمی بودن و سازگاری زیستی این اسید موجب شده است که به‌عنوان گزینه‌ای ایمن برای کاربرد در فرآورده‌های چوبی مطرح شود، به‌ویژه در شرایطی که احتمال تماس مستقیم یا غیرمستقیم با محیط‌های انسانی وجود دارد. گونه‌ی چوبی مورد استفاده در این پژوهش، صنوبر دلتوئیدس است که به‌عنوان یک گونه تند رشد شناخته می‌شود و در مدت زمانی نسبتاً کوتاه (حدود ۱۰ سال) به ابعاد قابل بهره‌برداری می‌رسد. صنوبرها بیش از ۸۰ درصد از درخت‌کاری‌های غیرجنگلی کشور را تشکیل می‌دهند و در نتیجه، سهم بزرگی از تولید چوب کشور از طریق زراعت چوب به این گونه اختصاص دارد. هدف این پژوهش، طراحی و توسعه یک سیستم نوآورانه برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در چوب با استفاده از اسید کاپریک به‌عنوان مواد تغییر فازدهنده است. این رویکرد با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد مواد تغییر فازدهنده، امکان ایجاد سامانه‌ای کارآمد با ظرفیت گرمایی نهان بالا و پاسخ سریع به تغییرات دمایی را فراهم می‌کند. نتیجه چنین سامانه‌ای، کاهش نوسانات دمایی فضای داخل ساختمان و کوتاه شدن زمان کارکرد سیستم‌های تهویه مطبوع فعال است، که در پی آن مصرف انرژی سرمایشی/گرمایشی کاهش می‌یابد. در نهایت، شاخص‌های استاندارد آسایش حرارتی در کاربردهای عملی، از جمله مصالح ساختمانی چوب، پانل‌های داخلی و مبلمان، بهبود

مواد تغییر فاز دهنده آلی<sup>۱</sup> به دلیل توانایی ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی در فرآیندهای تغییر فاز (ذوب و انجماد)، به‌عنوان راهکاری نوآورانه برای مدیریت انرژی حرارتی در کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد شامل گروه‌های مختلفی نظیر پارافین‌ها، اسیدهای چرب، و پلیمرها (مانند پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌اتیلن شبکه‌ای شده) هستند. در میان این مواد، اسیدهای چرب به دلیل دسترسی آسان، هزینه پایین، پایداری شیمیایی بالا، و خواص ترمودینامیکی مطلوب، به‌ویژه در کاربردهای صنعتی، توجه بسیاری از محققان را جلب کرده‌اند. یکی از چالش‌های اصلی چوب، جرم حرارتی بسیار پایین آن است که باعث محدودیت در توانایی ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی حرارتی می‌شود. از این رو، استفاده از مواد تغییر فاز در ساختار چوب به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در نظر گرفته می‌شود. از این رو، مواد تغییر فاز دهنده به‌دلیل خواص حرارتی مناسب و سازگاری با ساختار متخلخل چوب، گزینه‌ای ایده‌آل برای بهبود ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوب می‌شوند [۳]. در این راستا، تحقیقات نشان داده است که اشباع چوب با مواد تغییر فازدهنده می‌تواند عملکرد حرارتی آن را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. Barreneche و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از روش خلأ، مواد تغییر فازدهنده تجاری (RT۲۱) و (RT۲۷) را در چوب توسکا سیاه (Alnus Glutinosa) نفوذ دادند و با پوشش‌دهی سطحی پلی‌استایرن، از نشت مواد تغییر فازدهنده جلوگیری کرده و افزایش ظرفیت حرارتی نمونه‌ها را در اثر جذب بیشتر ماده تغییر فازدهنده گزارش نمودند [۱۴]. همچنین، Li و همکاران (۲۰۱۶) با اشباع چوب دوگلاس (Pseudotsuga menziesii) با پلی‌اتیلن گلیکول (PEG۱۰۰۰)، به نقطه ذوب ۲۶/۷۴ درجه سانتی‌گراد و ظرفیت نهان ۷۳/۵۹ J/g دست یافتند که برای کاربرد در دیوارهای خارجی ساختمان در مناطق سردسیر مناسب تشخیص داده شد و امکان ذخیره گرمای روزانه و آزادسازی آن در شب را فراهم می‌کند [۱۵]. در تحقیق دیگری، Montanari و همکاران (۲۰۱۹) با نفوذ پلی‌اتیلن گلیکول (PEG۱۰۰۰) و متیل متاکریلات در چوب لیکنین زدایی شده، کامپوزیتی

<sup>۱</sup> Organic Phase Change Materials

بررسی خواص چرخه حرارتی و  $2 \times 1$  سانتی متر سانی- متر (طولی×شعاعی×مماسی) برای آزمون تصویربرداری مادون قرمز استفاده شدند. ماده تغییر فاز مورد استفاده در این پژوهش، اسید کاپریک (اسید دکانویک، ۵-۴۸- CAS No.۳۳۴) با درجه خلوص بیش از ۹۸ درصد بود که از شرکت Merck تهیه شد. ساختار شیمیایی اسید کاپریک در شکل ۳ نشان داده شده است. ویژگی های مشخصات فیزیکی و حرارتی آن نیز در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۳- ساختار شیمیایی اسید کاپریک [۱۷]

جدول ۱- ویژگی های مواد تغییر فاز دهنده اسید کاپریک [۱۷]

| فرمول مولکولی            | C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> |
|--------------------------|------------------------------------------------|
| وزن مولکولی              | ۱۷۲/۲۷ g/mol                                   |
| ظاهر                     | بلورهای سفید                                   |
| رنگ                      | زرد روشن                                       |
| دانسیته                  | ۰/۸۹g/ml                                       |
| نقطه ذوب                 | ۳۱-۳۲ °C                                       |
| نقطه جوش                 | ۲۶۸/۷۰C                                        |
| ظرفیت ذخیره انرژی گرمایی | ۱۹۳/۹ J/g                                      |

اشباع شده دوباره توزین شدند و میزان افزایش وزن ناشی از جذب اسید کاپریک با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

رابطه ۱  $100 \times (W_2 - W_1) / W_1 =$  درصد افزایش وزن

$W_1$ : وزن نمونه پیش از اشباع (g);  $W_2$ : وزن نمونه پس از اشباع (g)

میزان جذب نمونه چوب صنوبر از اسید کاپریک معادل  $5 \pm 55$  درصد بود.

می یابد. این پژوهش می تواند به عنوان یک گام مؤثر در جهت توسعه راهکارهای پایدار و اقتصادی برای مدیریت انرژی در ساختمان ها محسوب گردد.

## مواد و روش ها

برای انجام آزمون ذخیره انرژی حرارتی، نمونه های چوبی بدون عیب و نقص از درخت صنوبر دلتوئیدس (Populus deltoides) از منطقه میرزا کوچک خان جنگلی شهر آمل انتخاب و تهیه گردیدند. نمونه های چوبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 1$  سانتی متر (طولی×شعاعی×مماسی) برای

## اشباع نمونه ها با اسید کاپریک

نمونه های چوبی پس از قرارگیری در آون  $30 \pm 10^\circ C$  به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت  $0.01$  گرم توزین شدند. برای اشباع، نمونه ها در ظرفی مناسب قرار گرفتند و برای جلوگیری از شناور شدن نمونه ها در محلول، با وزنه هایی مهار شدند. سپس ظرف حاوی نمونه ها در دستگاه خشک کن خلاء قرار گرفت و خلاء اولیه به میزان  $0.8$  - بار به مدت ۱۰ دقیقه به منظور مکش هوا از حفرات سلولی نمونه های چوبی اعمال شد. پس از تکمیل مرحله خلاء اولیه، محلول اسید کاپریک با غلظت ۷۶ درصد به ظرف حاوی نمونه ها اضافه شد و به منظور تسهیل نفوذ محلول به داخل ساختار چوب، فرآیند خلاء مجدداً به مدت یک ساعت اعمال گردید. پس از پایان فرآیند اشباع، نمونه های

### آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی<sup>۱</sup> (DSC)

برای بررسی رفتار حرارتی نمونه‌ها و به‌دست آوردن نقاط ذوب و انجماد مواد تغییر فاز و همچنین ظرفیت ذخیره گرمایی آنها از دستگاه گرماسنج پویش دیفرانسیلی<sup>۲</sup> با نام تجاری NETZSCH ساخت کشور آلمان استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش با جرم تقریبی ۵-۱۰ میلی‌گرم در ظروف آزمایشی دور از رطوبت آماده شدند. آزمون DSC با آهنگ دمایی  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  و در بازه دمایی ۵-۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت محیط اتمسفر آرگون انجام شد. گرمای نهان PCMها، به طور کلی از انتگرال‌گیری عددی سطح زیر پیک‌ها به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده انتقال فاز جامد-جامد، جامد-مایع و بالعکس می‌باشند.

### آزمون چرخه حرارتی

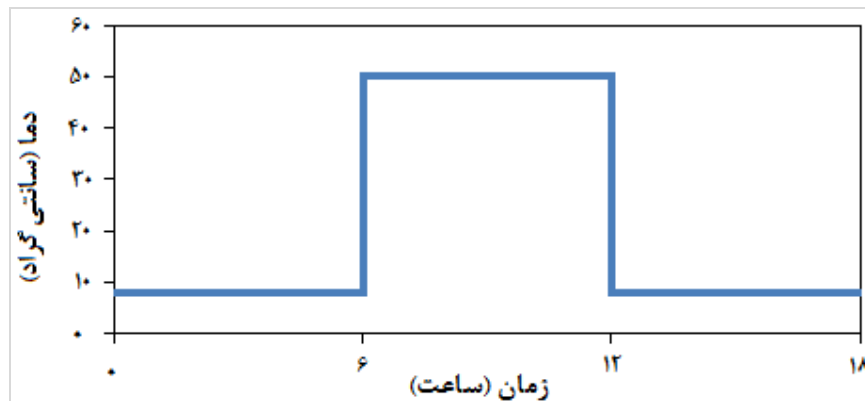
برای ارزیابی عملکرد حرارتی نمونه‌های حاوی مواد تغییر فازدهنده تحت شرایط دمایی مختلف از آزمون چرخه حرارتی با استفاده از دستگاه چرخه حرارتی در اتاقک مخصوص انجام گرفت تا به طور دقیق تغییرات دما و ویژگی‌های حرارتی نمونه‌ها بررسی شود. به این منظور، در یک لبه نمونه، سوراخی با قطر کوچک ایجاد شد که تا مرکز نمونه ادامه داشت تا امکان قرارگیری ترموکوپل در داخل نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک فراهم شود، پیش از قرار دادن ترموکوپل در نمونه، نوک آن به‌طور کامل با ماده رسانای حرارتی (Electrolube TBS) پوشش داده شد تا دقت اندازه‌گیری دما افزایش یابد. تمامی ترموکوپل‌های مورد استفاده از نوع ۰۸ Picotech-TC بودند و به سیستم رایانه‌ای متصل شدند تا داده‌های دمایی با استفاده از ترمومتر دیجیتال پیشرفته مدل ۵۰۰۰ Data Logger & NOVA موجود در دانشگاه قاضی عثمان پاشا کشور ترکیه ثبت و ترسیم گردند.

برنامه سیکل حرارتی نمونه‌ها مطابق با شکل شماره ۴ در بازه‌ی دمایی ۱۰ تا ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت سیکل-های متناوب تکرار گردیده است. این فرآیند به ما این امکان را می‌دهد که به طور جامع عملکرد حرارتی مواد تغییر فازدهنده را در شرایط دماهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

### ارزیابی دمای سطح نمونه‌ها

برای ارزیابی توزیع دمای سطح نمونه‌ها، از دوربین مادون قرمز استفاده شد. این روش مبتنی بر این اصل است که هر ماده در حین انتقال یا ذخیره انرژی گرمایی، تشعشعات مادون قرمز ساطع می‌کند که می‌تواند به‌عنوان شاخصی از رفتار گرمایی ماده مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا، آزمایش‌های تصویربرداری حرارتی با استفاده از دوربین مادون قرمز مدل Olip P2۰۰، موجود در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس، انجام شد. این دوربین با توانایی ثبت تصاویر حرارتی با رزولوشن بالا و حساسیت مناسب به تغییرات دمایی از ۲۰- تا ۳۵۰ درجه سانتی-گراد، امکان تحلیل دقیق توزیع گرما در سطح نمونه‌ها را فراهم می‌کند. نمونه‌های چوبی اشباع شده با اسید کاپریک پیش از آزمایش، به‌صورت دقیق تمیز و خشک و سپس در شرایط آزمایشگاهی با دمای کنترل شده قرار گرفتند تا تاثیر عوامل محیطی و خارجی بر تصاویر حرارتی به حداقل برسد. پس از تثبیت شرایط، نمونه‌ها به صورت کنترل شده در معرض دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. دمای سطح نمونه‌ها به‌وسیله دوربین تصویربرداری مادون‌قرمز اندازه‌گیری و ثبت شد. تصاویر حرارتی تهیه‌شده از نمونه‌ها استخراج گردید و داده‌های دمایی به‌دست‌آمده با بهره‌گیری از نرم‌افزار تخصصی مربوط به دوربین، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

<sup>۱</sup>Differential Scanning Calorimetry



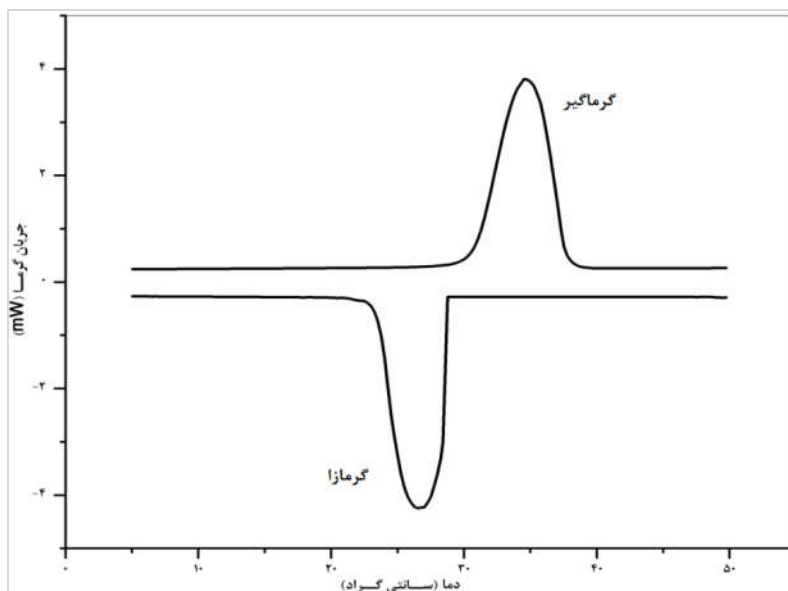
شکل ۴- چرخه حرارتی تنظیم شده در دستگاه آزمون چرخه حرارتی

## نتایج و بحث

### آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی<sup>۱</sup> (DSC)

نتایج آزمون DSC نمونه اسید کاپریک خالص در شکل شماره ۵ نشان داده شدند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد؛ نمودار برای اسید کاپریک خالص دارای یک پیک است. در واقع وجود این پیک در نمودار، تغییر ساختار جامد-مایع و مایع-جامد در مواد تغییر فازدهنده را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که دمای ذوب این ماده در حدود  $30/8$  درجه سانتی‌گراد و دمای انجماد آن حدود  $28/8$  درجه سانتی‌گراد است که این موضوع بیانگر محدوده تغییر فاز نسبتاً باریکی برای اسید کاپریک می‌باشد. گرمای نهان ذوب اسید کاپریک برابر با  $\text{KJ/kg}$

$193/9$  و گرمای نهان انجماد آن برابر با  $194/4 \text{ KJ/kg}$  اندازه‌گیری شد. این مقادیر بیانگر توانایی بالای اسید کاپریک در جذب و ذخیره مقادیر قابل توجهی انرژی گرمایی در طول فرایند تغییر فاز است. تفاوت اندک بین گرمای نهان ذوب و انجماد نشان‌دهنده تکرارپذیری و پایداری حرارتی این ماده در چرخه‌های متعدد تغییر فاز است. این ویژگی‌ها، می‌تواند اسید کاپریک را به‌عنوان یک ماده تغییر فازدهنده مناسب برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی برای بهبود کنترل دما و بازده انرژی در داخل ساختمان معرفی کرد. به‌ویژه، توانایی این ماده در حفظ دما و کاهش نوسانات حرارتی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها کمک کند.

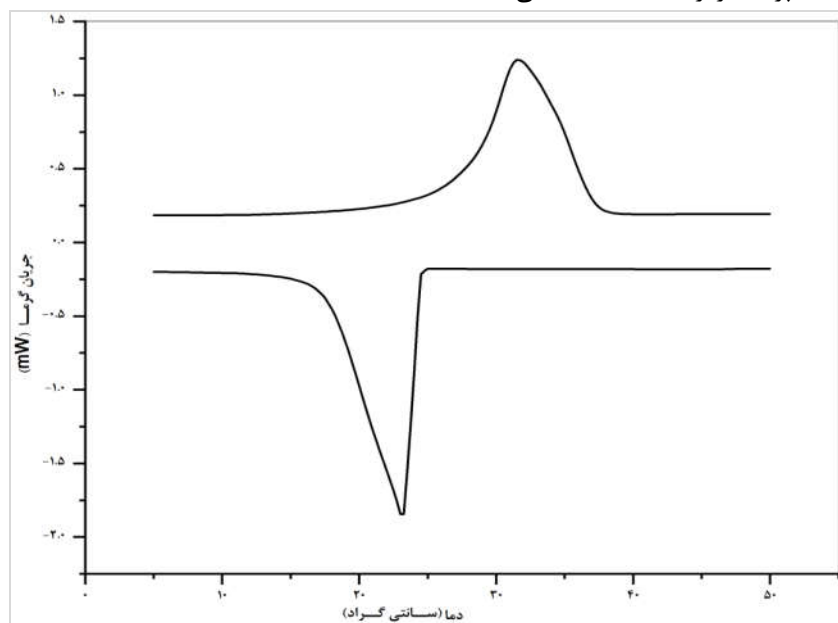


شکل ۵- نمودار DSC اسید کاپریک

<sup>1</sup> Differential Scanning Calorimetry

که در مقایسه با نمونه‌های اسید کاپریک خالص تقریباً ۵۵ درصد کاهش یافته است که می‌توان به دلایلی هم چون محصور شدن مواد تغییر فازی در منافذ چوب، جرم حرارتی پایین چوب، پیوند بین زنجیره‌های اسید کاپریک و ترکیبات چوب و اثر نیروی موئینگی بین مولکول‌های اسید کاپریک با دیواره‌های سلولی چوب اشاره نمود [۱۸، ۱۹]. این نتایج نشان می‌دهند که هرچند توان ذخیره گرمایی نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک نسبت به ماده خالص کاهش می‌یابد، اما ویژگی‌های حرارتی و عملکردی آن در محدوده دمایی مناسب برای کاربردهای ساختمانی حفظ می‌گردد و از مزایای ساختاری و عایقی چوب بهره‌مند می‌گردند. بنابراین، استفاده از اسید کاپریک به عنوان ماده تغییر فاز در زمینه چوب می‌تواند راه‌حلی کارآمد برای بهبود بازده انرژی و پایداری حرارتی در سیستم‌های داخلی ساختمان باشد.

نتایج آزمون DSC نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک در شکل ۶ نشان داده شده است. هم چنین مقدار دمای نقطه ذوب و گرمای نهان چوب اشباع شده با اسید کاپریک در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌گردد؛ دمای نقطه ذوب نمونه‌ها ۲۸/۲ درجه سانتی‌گراد دمای نقطه انجماد ۲۳/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دمای پیک قله با کاهش زیادی برابر با ۳۱/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که از جمله اصلی‌ترین عوامل می‌توان به ماهیت جرم حرارتی پایین و عایق بودن حرارتی چوب اشاره نمود. یادآوری می‌شود که دمای ذوب نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک در بازه دمایی آسایش حرارتی (۳۰-۱۳ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد، از این رو شرایط آسایش حرارتی را در ساختمان فراهم می‌کنند. هم چنین سطح زیر پیک در این بازه معرف ظرفیت ذخیره گرمای نهان ذوب نمونه‌های چوب اشباع شده با اسید کاپریک برابر با ۸۶/۰۱ J/g می‌باشد



شکل ۶- نمودار DSC چوب اشباع شده با اسید کاپریک

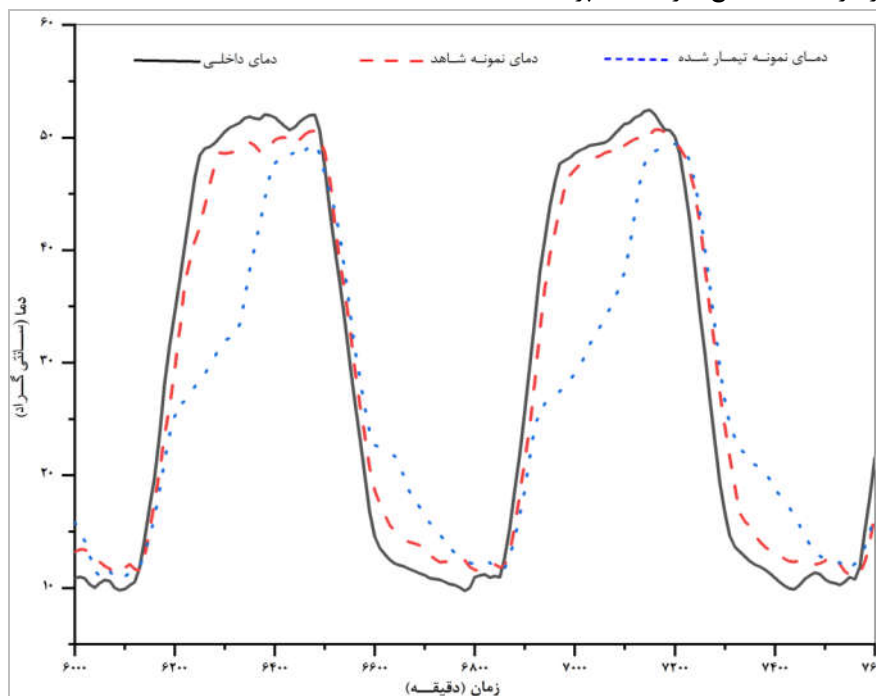
جدول ۲- دمای تغییر فاز و گرمای ذخیره نهان انرژی نمونه چوب اشباع شده با اسید کاپریک

| نمونه آزمایش                 | انجماد                  |                         |                        |                    | گرمایش               |                      |                   |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
|                              | گرمای نهان انجماد (J/g) | انتهای نقطه انجماد (°C) | بالای نقطه انجماد (°C) | شروع جامد شدن (°C) | گرمای نهان ذوب (J/g) | انتهای نقطه ذوب (°C) | شروع ذوب شدن (°C) |
| اسید کاپریک                  | -۱۹۴/۴                  | ۲۳/۳                    | ۲۶/۶                   | ۲۸/۸               | ۱۹۳/۹                | ۳۷/۷                 | ۳۰/۸              |
| چوب اشباع شده با اسید کاپریک | -۸۳/۸۲                  | ۱۸                      | ۲۳/۶                   | ۲۳/۹               | ۸۶/۰۱                | ۳۷/۱                 | ۲۸/۲              |

## آزمون چرخه حرارتی

نتایج حاصل از آزمون چرخه حرارتی انجام شده روی نمونه‌های چوبی صنوبر اشباع شده و اشباع نشده با مواد تغییر فازدهنده اسید کاپریک در شکل ۷ ارائه شده‌اند. این شکل تغییرات دمایی هوای داخل محفظه (دستگاه کنترل دما) و دمای داخلی نمونه‌های چوبی، با و بدون مواد تغییر فازدهنده را نمایش می‌دهد. در این نمودار، دو مرحله اصلی فرآیند چرخه حرارتی، یعنی گرمایش (افزایش دما با هدف جذب انرژی حرارتی) و سرمایش (کاهش دما و آزادسازی انرژی حرارتی با قطع حرارتی دهی) به وضوح مشخص شده‌اند. همانطور که در نمودار مشخص می‌باشد در مرحله گرمایش، نمونه‌های چوبی فاقد PCM رفتار دمایی یکنواختی نشان می‌دهند؛ به طوری که دمای داخلی چوب به صورت خطی و متناسب با افزایش دمای محیط محفظه افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده فقدان مکانیزم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختار چوب خام است. در مقابل، نمونه‌های اشباع شده با اسید کاپریک، تغییرات دمایی متفاوتی نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها، افزایش دما با تأخیر زمانی قابل توجهی نسبت به نمونه‌های بدون PCM رخ می‌دهد. این تأخیر زمانی به دلیل وقوع فرآیند تغییر فاز (از جامد به مایع) در اسید کاپریک است

که طی آن، انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان جذب می‌شود. در مرحله سرمایش، روند معکوسی مشاهده می‌شود. در نمونه‌های بدون PCM، دمای داخلی چوب به سرعت کاهش می‌یابد و به دمای محیط محفظه نزدیک می‌شود، که نشان‌دهنده فقدان ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در این نمونه‌ها است. اما در نمونه‌های اشباع شده با اسید کاپریک، کاهش دما با سرعت کمتری رخ می‌دهد. این رفتار به دلیل فرآیند معکوس تغییر فاز (از مایع به جامد) در اسید کاپریک است که طی آن، گرمای نهان ذخیره شده در مرحله گرمایش به تدریج آزاد می‌شود. این آزادسازی گرما باعث می‌شود که دمای نمونه‌های حاوی PCM برای مدت طولانی‌تری در سطح بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون PCM باقی بماند. در عمل، این تأخیر زمانی منجر به کاهش شیب تغییرات دمایی داخل اتاق می‌شود. به معنای دیگر، در صورتی که از نمونه‌های چوبی حاوی PCM در طراحی داخلی اتاق استفاده شود؛ می‌توان نوسانات دمایی را به طور معناداری کاهش داد. این ویژگی نشان‌دهنده کارایی بالای PCM در جذب و ذخیره‌سازی حرارت در زمان گرمایش و آزادسازی آن در زمان سرمایش است.



شکل ۷- نمایی از سیکل حرارتی نمونه‌ی چوبی دارای ماده تغییر فاز دهنده

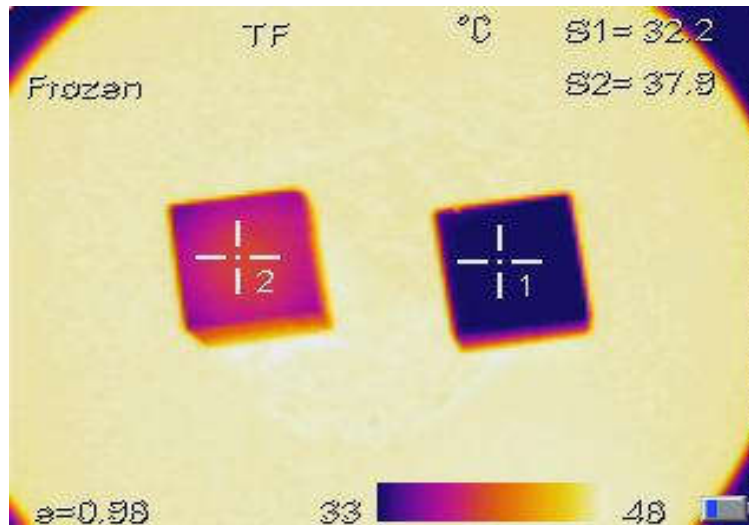
اختلاف دمایی نمونه‌های حاوی PCM و بدون PCM در شکل ۷ نیز آورده شده است. در این نمودار نشان می‌دهد که این رفتار اسید کاپریک به‌عنوان یک ماده تغییر فازدهنده آلی به ویژگی‌های ترمودینامیکی آن، از جمله دمای تغییر فاز (حدود ۳۱-۳۲ درجه سانتی‌گراد برای اسید کاپریک) و ظرفیت گرمایی نهان بالا، وابسته است. این ماده با جذب و آزادسازی انرژی حرارتی طی فرآیندهای تغییر فاز، نقش مهمی در کاهش نوسانات دمایی ایفا می‌کند. در کاربردهای عملی، استفاده از مقدار مناسب اسید کاپریک در ساختارهای چوبی می‌تواند به کاهش شیب تغییرات دمایی در محیط‌های داخلی منجر شود. این ویژگی به‌ویژه در کاربردهای مدیریت انرژی حرارتی، مانند عایق‌های ساختمانی یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌طور خاص، توانایی اسید کاپریک در تثبیت دما و کاهش نوسانات دمایی می‌تواند به بهبود کارایی انرژی در ساختمان‌ها و کاهش مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش کمک کند. در مجموع، نتایج این آزمون نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه اسید کاپریک به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده در بهبود خواص حرارتی نمونه‌های چوبی است. این ماده با ایجاد تأخیر در تغییرات دمایی و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در راستای توسعه مصالح ساختمانی با عملکرد حرارتی بهینه و نیز بهبود شرایط آسایش حرارتی در فضاهای زندگی مؤثر باشد.

### تصویربرداری مادون قرمز

برای بررسی و تحلیل عملکرد گرمایی نمونه‌های چوبی حاوی مواد تغییر فازدهنده با استفاده از اسید کاپریک، از تکنیک تصویربرداری حرارتی مادون قرمز در دانشگاه

تربیت مدرس بهره گرفته شد. نتایج انتشار گرما نمونه‌های دارای مواد تغییر فاز دهنده و بدون مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۸ نشان داده شده است. این تصاویر به‌وضوح تفاوت‌های قابل‌توجهی در رفتار گرمایی بین نمونه‌های حاوی اسید کاپریک و نمونه‌های شاهد را نشان می‌دهند. در نمونه‌های اشباع‌شده با اسید کاپریک، دمای سطحی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از نمونه‌های بدون PCM مشاهده شده است. این اختلاف دمایی در تصاویر حرارتی به‌صورت روشن‌تر شدن رنگ نمونه‌های حاوی PCM نمایان است که نشان‌دهنده افزایش جذب و ذخیره انرژی گرمایی توسط اسید کاپریک است. این پدیده به خاصیت گرمایی نهان اسید کاپریک مرتبط است که طی فرآیند تغییر فاز (از جامد به مایع) انرژی گرمایی را ذخیره کرده و در نتیجه، دمای سطح نمونه را در مقایسه با نمونه‌های شاهد به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد.

علاوه بر این، تحلیل تصاویر حرارتی نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر گرما در نمونه‌های حاوی PCM است که می‌تواند به ساختار متخلخل چوب و پراکندگی مناسب اسید کاپریک در آن نسبت داده شود. این ویژگی، کاربرد بالقوه این نمونه‌ها را در سیستم‌های مدیریت گرمایی، به‌عنوان مصالح ساختمانی با قابلیت ذخیره انرژی، برجسته می‌کند. در مقابل، نمونه‌های بدون PCM به دلیل فقدان ماده تغییر فازدهنده، گرما را به‌صورت تشعشعی سریع‌تر از دست داده و دمای سطحی پایین‌تری را نشان می‌دهند. در مجموع، نتایج این آزمایش تأیید می‌کند که استفاده از اسید کاپریک به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده در نمونه‌های چوبی، عملکرد گرمایی آن‌ها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. این امر از طریق افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان و کاهش نوسانات دمایی سطح نمونه‌ها محقق شده است.



شکل ۸- عملکرد حرارتی نمونه‌های (۱) شاهد، (۲) تیمار شده، با دوربین حرارتی مادون قرمز

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی کاربرد PCM به ویژه اسید کاپریک در چوب صنوبر به عنوان یک راهکار نوین برای بهینه‌سازی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختمان‌ها پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای اسید کاپریک به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده در بهبود ویژگی‌های حرارتی چوب صنوبر است. اشباع چوب با این ماده نه تنها ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را افزایش می‌دهد؛ بلکه قادر است نوسانات دمایی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. آزمون‌ها نشان دادند که نمونه‌های چوبی اشباع شده با اسید کاپریک، رفتار گرمایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند؛ به‌ویژه در مراحل گرمایش و سرمایش، باعث می‌شود که دما برای مدت طولانی‌تری در سطح مطلوب باقی بماند. این روش نه تنها می‌تواند به بهبود کارایی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی کمک کند؛ بلکه به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده بیش از حد از منابع انرژی گردد. به‌علاوه، نتایج تصویربرداری حرارتی نشان دادند که نمونه‌های حاوی اسید کاپریک دارای توزیع حرارتی یکنواخت‌تری هستند که این امر نشان‌دهنده کارایی این ماده در جذب و حفظ انرژی گرمایی است. نتایج چرخه حرارتی نیز تأیید کرد که نمونه‌های چوبی حاوی PCM، به‌ویژه در شرایط دمایی متفاوت، رفتار حرارتی بهتری را نسبت به نمونه‌های بدون

PCM از خود نشان دادند که این امر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی و بهبود شرایط آسایش حرارتی ساکنان منجر شود. با توجه به این نتایج، می‌توان استنباط کرد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده همچون اسید کاپریک در صنایع ساختمانی و مصالح چوبی، یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی در فضاهای زندگی است. در نهایت، این پژوهش به‌طور مؤثر به مزایای عملی و اقتصادی مرتبط با استفاده از اسید کاپریک در سیستم‌های ساختمانی اشاره دارد و می‌تواند پایه‌گذار بررسی‌ها و پژوهش‌های بیشتر در این زمینه باشد.

## منابع

- [1] Energy USDO., 2011. Buildings energy data book. United States of America. Energy efficiency & Renewable Energy. [http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/davidson1/docs/2011\\_BEDB.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/davidson1/docs/2011_BEDB.pdf).
- [2] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F. and Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 23, pp. 251-283. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431102001928>.
- [3] Jamekhorshid, A., Sadrameli, S.M., Barzin, R. and Farid, M., 2017. Composite of Wood-Plastic and Micro-Encapsulated Phase Change Material (MEPCM) Used for Thermal Energy Storage.

- Office Buildings. *Energy Sources*, 13 (1), pp. 39-54. <https://doi.org/10.1080/00908319108908967>.
- [12] Koo, J., So, H., Hong, S.W. and Hong, H., 2011. Effect of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings. *Energy and Buildings*, 43(8), pp. 1947-1951. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811001472>.
- [13] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. and Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 318-345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [14] Barreneche, C., Vecstaudza, J., Bajare, D., Fernandez, A.I., 2017. PCM/wood composite to store thermal energy in passive building envelopes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 251.
- [15] Li, Y., Li, X., Liu, D., Cheng, X., He, X., Wu, Y., Li, X., 2016. Fabrication and properties of polyethylene glycol-modified wood composite for energy storage and conversion. *Bioresources* vol. 113, pp. 7790-7802.
- [16] Montanari, C., Li, Y., Chen, H., Yan, M., Berglund, L.A., 2019. Transparent wood for thermal energy storage and reversible optical transmittance. *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 11(22), pp. 20465-72.
- [17] [https://www.merckmillipore.com/DE/de/product/Decanoic-acid,MDA\\_CHEM802169?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.merckmillipore.com/DE/de/product/Decanoic-acid,MDA_CHEM802169?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F).
- [18] Temiz, A., Hekimoglu, G., Köse Demirel, G., Sari, A., Mohamad Amini, M.H., 2020. Phase change material impregnated wood for passive thermal management of timber buildings. *International Journal of Energy Research*, 44, pp. 10495-10505. <https://doi.org/10.1002/er.5679>.
- [19] Can, A., Gencel, O., Sari, A., Hekimoğlu, G., Ustaoglu, A., Temiz, A., Erdoğmuş, E., Erdeyer, Ö.N., 2025. Development of Poplar Wood/Bio-Based Composite Phase-Change Material as Novel Ecofriendly Thermo-Regulative Material. *Forests*, 16, pp. 763-783. <https://doi.org/10.3390/f16050763>.
- Applied Thermal Engineering*, 112, pp. 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.037>.
- [4] Mehling, H. and Cabeza, L.F., 2008. *Heat and Cold Storage with PCM*. Berlin, Springer Verlag; <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-68557-9>.
- [5] Hawes, D.W., Feldman, D. and Banu, D., 1993. Latent heat storage in building materials. *Energy and buildings*, 20, pp. 77-86. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(93\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0378-7788(93)90040-2).
- [6] Stritih, U. and Novak, P., 1996. Solar Heat Storage Wall for Building Ventilation. *Renewable Energy*, 8, pp. 268-271. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148196888604>.
- [7] Schossig, P., Henning, H.M., Gschwander, S. and Haussmann, T., 2005. Micro- Encapsulated Phase-Change Materials Integrated into Construction Materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89 (2-3), pp. 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.017>.
- [8] Cabeza, L., Medrano, M., Castellón, C., Castell, A., Solé, C., Roca, J. and et al., 2007. Thermal Energy Storage with Phase Change Materials in Building Envelopes. *Contributions to Science*, 3 (4), pp. 501-510. <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/f6d05b8c-77ea-4dad-86b9-1b95b02d0289/content>.
- [9] Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Nogués, M., Castell, A. and Cabeza, L., 2007. Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications. *Buildings X, ASHRAE*, 48, pp. 1-7. [https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2007%20B10%20papers/035\\_Castellon.pdf](https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2007%20B10%20papers/035_Castellon.pdf).
- [10] Lin, K., Zhang, Y., Xu, X., Di, H., Yang, R. and Qin, P., 2004. Modeling and Simulation of Under-Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates. *Building and Environment*, 39 (12), pp. 1427-1434. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132304001271>.
- [11] Guthertz, J. M. and Schiler, M. E., 1991. A Passive Solar Heating System for the Perimeter Zone of