



Numerical Study of a System Based on Phase Change Materials for Energy Storage in Buildings Considering the Geometric Characteristics of Integrated Fins

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Moshiri A.¹,
Raji Asadabadi M.J.¹,
Moghimi M.^{1*},

How to cite this article

Moshiri A, Raji Asadabadi M.J, Moghimi M, Numerical Study of a System Based on Phase Change Materials for Energy Storage in Buildings Considering the Geometric Characteristics of Integrated Fins. Modares Mechanical Engineering. 2025;25(03):163-174.

¹ Mechanical Engineering Department, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

moghimi@iust.ac.ir

Article History

Received: January 08, 2025

Accepted: April 22, 2025

ePublished: May 19, 2025

ABSTRACT

Phase change materials (PCMs), due to their ability to store and release thermal energy, are widely used to enhance the energy efficiency of buildings and thermal systems. In this study, the effect of adding horizontal and angled fins to PCM-containing enclosures on the melting process and thermal performance was investigated numerically. The simulation results showed that the addition of fins, by increasing the contact surface and enhancing natural convection, accelerates the melting process and increases the average temperature of the enclosure. After 600 seconds, the average liquid fraction in the cases of no fin, horizontal fin, 30° positive-angle fin, and 30° negative-angle fin was 0.27, 0.42, 0.40, and 0.39, respectively. Similarly, the normalized average temperature of the PCM enclosure in these configurations reached 0.58, 0.94, 0.92, and 0.93, respectively. Among the different configurations, horizontal fins provided the most uniform heat distribution and were identified as the most suitable option for achieving complete and stable melting. Angled fins, depending on their orientation, can direct heat transfer toward specific zones: upward for 30° positive fins and downward for 30° negative fins. These findings highlight the importance of purposeful fin design tailored to practical needs and operational conditions for optimizing the performance of thermal energy storage systems.

Keywords Numerical Investigation, Phase Change Materials, Energy Storage, Heat Transfer Improvement, Integrated Fin

CITATION LINKS

1- Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, 2- A Review on Phase Change Energy Storage, 3- Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, 4- Advancing PCM research in building efficiency: A comprehensive ... 5- Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview, 6- Review on thermal energy storage with ... 7- A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM), 8- Energy saving potential of phase change materials in ... 9- Review on thermal energy storage with ... 10- Implementation of a double layer of PCM integrated into ... 11- Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, 12- Innovative materials integrated with PCM for ... 13- 1 - Introduction to thermal energy storage (TES) systems, 14- Review on thermal energy storage with ... 15- Evaluation of phase change materials ... 16- Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM, 17- A comparison of heat transfer enhancement in ... 18- Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review, 19- Parametric study of an active-passive system for ... 20- Investigation of a packed bed energy storage system with ... 21- Effect of Nanomaterial Inclusion in ... 22- Energy flexibility of ... 23- Experimental investigation of novel bio-composite ... 24- Enhancing building energy efficiency and ... 25- Towards Passive Building Thermal Regulation: A State-of-the-Art Review on ... 26- Numerical model for determining the effective heat capacity of ... 27- Potential of phase change materials (PCM) for ... 28- Dynamic integration of phase change material in ... 29- Implementation of a double layer of PCM integrated ... 30- Experimental study of dynamic PCM integration in ... 31- Phase change material-based building architecture for ... 32- The Scientific and Technical Centre for Building, 33- Technical assessment, economic viability and ... 34- Parametric CFD analysis and impact of PCM intrinsic parameters on ... 35- Thermal design and optimization

بررسی عددی یک سیستم مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی در ساختمان با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی فین‌های ادغام شده

علی مشیری^۱، محمدجواد راجی اسدآبادی^۱، مهدی مقیمی^{۱*}

^۱ گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

مواد تغییر فازدهنده (PCM) به دلیل توانایی در ذخیره و آزادسازی حرارت، کاربرد گسترده‌ای در افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها و سیستم‌های حرارتی دارند. در این پژوهش، اثر افزودن فین‌های افقی و زاویه‌دار به مخازن حاوی PCM بر فرآیند ذوب و عملکرد حرارتی سیستم به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که اضافه کردن فین‌ها با افزایش سطح تماس و تقویت جریان همرفتی، موجب تسریع ذوب و افزایش دمای متوسط مخزن می‌شود. میانگین کسر حجمی مایع پس از ۶۰۰ ثانیه، در حالت‌های بدون فین، فین افقی، فین با زاویه ۳۰° و فین با زاویه ۳۰°- به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۴۲، ۰/۴۰ و ۰/۳۹ بود. همچنین، دمای میانگین مخزن در این حالت‌ها به ترتیب به ۰/۵۸، ۰/۹۴، ۰/۹۲ و ۰/۹۳ (به صورت نرمال شده) رسید. در میان پیکربندی‌های مختلف، فین‌های افقی به دلیل ایجاد توزیع یکنواخت حرارتی، مناسب‌ترین گزینه برای دستیابی به ذوب کامل و پایدار هستند. فین‌های زاویه‌دار نیز بسته به جهت‌گیری، می‌توانند تمرکز انتقال حرارت را به نواحی بالایی (زاویه ۳۰°) یا پایینی (زاویه ۳۰°-) مخزن تسهیل کنند. این یافته‌ها بیانگر اهمیت طراحی هدفمند فین‌ها متناسب با نیازهای کاربردی و شرایط عملیاتی در بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های ذخیره انرژی حرارتی است. **کلیدواژه‌ها:** بررسی عددی، مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره انرژی، بهبود انتقال حرارت، فین ادغام شده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

*نویسنده مسئول: moghimi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

ادغام مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در ساختمان‌ها به عنوان رویکردی نوآورانه برای افزایش بهره‌وری انرژی و پایداری مطرح شده است. این مواد با توانایی جذب، ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی در طول تغییر فاز (معمولاً از جامد به مایع و بالعکس) پتانسیل قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی داخلی را نشان داده‌اند. استفاده استراتژیک از PCM در اجزای ساختمانی مانند دیوارها، سقف‌ها و کف‌ها، با کاهش تأثیر نوسانات دمای خارجی به تثبیت دمای داخلی کمک می‌کند. این قابلیت نه تنها وابستگی به سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع (HVAC) سنتی را کاهش می‌دهد، بلکه باعث کاهش هزینه‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.^{[1]، [2]}

در چشم‌انداز انرژی مدرن، ابزارها، تکنیک‌ها و سیستم‌های مرتبط با انرژی حرارتی در طراحی ساختمان با سرعت قابل توجهی در حال پیشرفت هستند. اتخاذ فرآیندهایی که استفاده بهینه از سوخت‌های فسیلی را ممکن سازد و توانایی‌های جذب، ذخیره‌سازی و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد، ضروری شده است. مطالعات متعددی بر روی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی انجام شده که بر بهینه‌سازی ظرفیت تبادل انرژی PCM متمرکز بوده‌اند.^[3]

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از PCM در اجزای مختلف ساختمان به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از PCM، نرخ پایین انتقال حرارت در طول فرآیند ذوب و انجماد است که می‌تواند بر کارایی کلی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی تأثیرگذار باشد. به منظور غلبه بر این محدودیت، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از فین‌های حرارتی برای افزایش سطح تماس و تقویت همرفت داخلی درون محفظه‌های حاوی PCM پیشنهاد شده است.^[4]

طراحی هندسی مناسب این فین‌ها در ساختارهای ساختمانی از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که نوع، موقعیت و زاویه قرارگیری فین‌ها می‌تواند به طور مستقیم بر نحوه توزیع حرارت و عملکرد حرارتی اجزای سازه‌ای مانند دیوارهای دوپوسته، سقف‌ها و پوشش‌های خارجی ساختمان تأثیرگذار باشد. به عنوان مثال در برخی ساختمان‌های مسکونی با مصرف انرژی بالا در مناطق سردسیر اروپا (مانند سوئد و آلمان)، از سیستم‌های PCM فین‌های آلومینیومی در پانل‌های سقفی استفاده شده تا گرمای حاصل از تابش روز را ذخیره کرده و شب‌ها به محیط بازگردانند. همچنین در پروژه‌های خانه‌های پیش‌ساخته یا مدولار با ساخت سریع نیز، ترکیب فین و PCM در پنل‌های دیواری باعث کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی گرمایش و سرمایش شده و به‌ویژه در کمپ‌های اضطراری یا مناطق محروم مؤثر واقع می‌گردد. از این‌رو، انجام تحلیل‌های عددی دقیق با هدف بررسی رفتار حرارتی سیستم‌های PCM دارای فین، می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در اختیار طراحان معماری و مهندسان انرژی برای انتخاب بهینه پیکربندی این سیستم‌ها قرار گیرد. در این راستا، توسعه مدل‌های دوبعدی عددی که شرایط واقعی عملکردی یک عنصر ساختمانی (نظیر دیوار یا سقف در معرض تابش) را شبیه‌سازی کنند، گام مهمی در جهت درک بهتر رفتار حرارتی این مواد و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در کاربردهای ساختمانی به شمار می‌آید. شبیه‌سازی چنین سیستم‌هایی با در نظر گرفتن مرزهای دمایی مشابه شرایط اقلیمی واقعی، می‌تواند چارچوبی مناسب برای طراحی آینده‌نگرانه سامانه‌های ذخیره انرژی در ساختمان‌ها فراهم آورد.^[4]

با وجود کاربردهای امیدبخش PCM در محیط‌های ساختمانی، چالش‌هایی همچنان باقی است، از جمله هزینه‌های اولیه بالا،

روز و آزادسازی آن در شب به کار گرفته شدند. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش مصرف انرژی شد، بلکه افزایش راحتی حرارتی ساکنان را نیز به همراه داشت. علاوه بر این، این تحقیق نشان داد که استفاده از PCM در ساختمان‌های تجاری می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. مطالعات دیگری توسط زالبا و همکاران^[14] و حسن و همکاران^[15] انجام شد که به بررسی کارایی PCM در مناطق مختلف جغرافیایی پرداختند. زالبا و همکاران دریافتند که استفاده از PCM در سقف‌های تجاری می‌تواند انتقال حرارت را تا ۴۰٪ کاهش دهد. در همین راستا، حسن و همکاران نشان دادند که پنل‌های خورشیدی مجهز به PCM علاوه بر ذخیره انرژی، توان تولید انرژی خورشیدی را نیز افزایش می‌دهند.

یک مطالعه توسط خدراوی و همکاران^[16] طراحی شد که در آن عملکرد حرارتی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، که برای استفاده شبانه طراحی شده است، بررسی شد و از مواد تغییر فاز (PCM) برای ذخیره انرژی خورشیدی در یک جمع‌کننده هوای خورشیدی بهره گرفته شد. استفاده از پره‌ها یک روش رایج برای افزایش سطح تبادل حرارت در محیط PCM است که به دلیل هزینه پایین و سادگی اجرا، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[17] تحقیقی دیگر توسط جاگوئمون و همکاران^[18] صورت گرفت که در آن تأثیر اصلاح هندسه و تقویت‌کننده‌های انتقال حرارت بر اساس کربن و مواد فلزی را بر روی انتقال حرارت مورد مطالعه قرار دادند و اثبات کردند که اصلاح هندسه تأثیر امیدوارکننده‌ای در افزایش انتقال حرارت دارد. در پژوهشی دیگر که در همین حوزه توسط بوها و همکاران^[19] صورت گرفت، گزارش کردند که ایجاد پره در محفظه دربردارنده PCM، می‌تواند زمان ذوب آن را از ۳۵ دقیقه به ۳۲ دقیقه کاهش دهد. در پژوهش دیگری که توسط مهرپویا و همکاران^[20] انجام گرفت گزارش شد که افزودن باله‌های تیز به درون محفظه دربردارنده PCM انتقال حرارت را بیشتر از باله‌های صاف بهبود می‌دهد.

علاوه بر این، تحقیقاتی توسط بارسوال و همکاران^[21] نشان داد که افزودن نانومواد به PCM می‌تواند عملکرد حرارتی این مواد را در طولانی‌مدت بهبود بخشد. آن‌ها گزارش کردند که پراکندن گرافن در PCM منجر به افزایش رسانایی حرارتی ۱۴ برابری شد.

این یافته‌ها پتانسیل تحول‌آفرین PCM‌ها را در دستیابی به اهداف ساخت و ساز پایدار برجسته می‌کنند. به عنوان مثال، ترکیب PCM با سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی که توسط وانگ و همکاران^[22] مورد مطالعه قرار گرفت، نشان داد که می‌توان به میزان ۲۴ تا ۳۲ درصد مصرف انرژی را کاهش داد. در تحقیق جدیدی که توسط پوندینه و همکاران^[23] صورت گرفت، ترکیب استفاده از مواد کامپوزیت دوستدار محیط زیست و PCM مورد بررسی قرار گرفت و گزارش کردند که این کار علاوه بر آن که می‌تواند تا موجب افزایش ظرفیت حرارتی مواد تا ۳۵ درصد گردد، دیگر ویژگی‌های ساختاری

نیاز به طراحی‌های دقیق برای ادغام مناسب و پایداری مواد در طول چرخه‌های حرارتی مکرر. تلاش‌های تحقیقاتی اخیر بر حل این چالش‌ها از طریق مهندسی مواد پیشرفته، بهینه‌سازی ویژگی‌های حرارتی و ارائه راه‌حل‌های طراحی نوآورانه متمرکز شده است. لینگ و پون^[5] تأثیر استفاده از بتن حاوی PCM بر کاهش انرژی مصرفی در ساختمان‌ها را بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن حاوی PCM می‌تواند انتقال حرارت را تا ۲۵٪ کاهش داده و پایداری حرارتی فضای داخلی را بهبود بخشد. از سوی دیگر، زالبا و همکاران^[6] نقش PCM در کاهش نوسانات دمایی در ساختمان‌های تجاری را مورد بررسی قرار دادند و کاهش ۴۰ درصدی بار سرمایشی را گزارش کردند. همچنین، بارینتوس و همکاران^[7] کاربرد PCM در دیواره‌های خارجی ساختمان‌ها را با توسعه یک مدل انتقال حرارت یک بعدی توسعه دادند. در سطوح خارجی ساختمان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که گنجاندن یک لایه PCM باعث افزایش بار حرارتی در طول روز و کاهش بار حرارتی در طول شب می‌شود. علم و همکاران^[8] پتانسیل صرفه‌جویی انرژی PCM را در شهرهای گرمسیری استرالیا بررسی کردند و بهبود ۲۰ درصدی در مصرف انرژی را گزارش نمودند. آن‌ها همچنین به تأثیر مثبت PCM بر کاهش نوسانات دمایی داخلی و افزایش آسایش حرارتی اشاره کردند. در مطالعه‌ای دیگر، ژو و همکاران^[9] تأثیر PCM بر کارایی انرژی در سیستم‌های نمای شیشه‌ای بررسی کرده و کاهش ۲۵ درصدی در مصرف انرژی سرمایشی را گزارش کردند. همچنین، رفاهی و همکاران^[10] کاربرد PCM در دیواره‌های دو لایه را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که این روش می‌تواند دمای داخلی را در نوسانات شدید دمایی ثابت نگه دارد. در مطالعه‌ای دیگر، کابزا و همکاران^[11] مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از PCM در ساختمان‌های مسکونی را بررسی کردند و بهبود بازدهی سرمایه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را گزارش نمودند.

این یافته‌ها نشان می‌دهند که PCM می‌تواند در مناطق با شرایط اقلیمی متنوع به‌طور موثری مصرف انرژی را کاهش دهد. با توجه به این نتایج، تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی ویژگی‌های حرارتی این مواد و کاهش هزینه‌های تولید آن‌ها مورد نیاز است. برای مثال، کارهای جدیدی توسط امین‌علی و همکاران^[12] به بررسی استفاده از یک ماده ترکیبی با PCM در ترکیب با پنل‌های خورشیدی پرداخت و نتایج نشان داد که این ترکیب می‌تواند بهره‌وری انرژی خورشیدی را تا ۲۳ درصد نسبت به پنل‌هایی که فقط از PCM برای خنک‌کاری استفاده می‌کنند افزایش دهد.

در مطالعه‌ای دیگری کابزا و همکاران^[13] بازدهی سرمایه قابل توجهی را در ساختمان‌های تجاری با استفاده از راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر PCM نشان داده‌اند. در این تحقیق، پنل‌های سقفی مجهز به PCM برای ذخیره انرژی حرارتی در طول

و یک لایه هوا به گونه ای طراحی شده اند که بتوانند موقعیت خود را در دیوار بسته به شرایط محیطی تغییر دهند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش دینامیک می تواند دمای متوسط فضای داخلی را تا ۹/۱ درصد کاهش داده و شار حرارتی پیک را تا ۱۱۶ درصد نسبت به حالت ایستا کاهش دهد.

در این بخش مروری از مطالعات صورت گرفته در حوزه PCM و با تمرکز بر کاربرد آن در حوزه ساختمان و ذخیره انرژی در آن ارائه گردید. بیان شد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان می تواند موجب بهبود بهره وری انرژی و صرفه جویی در مصرف آن گردد و روش هایی که دیگر پژوهشگران جهت افزایش بهره وری انرژی با استفاده از PCM به کار برده بودند مورد تحلیل قرار گرفت. ساخت مواد نو ترکیب با PCM جهت کار بست به عنوان اجزاء سازنده ساختمان به صورت بتن، استفاده از PCM در دیوارهای دوجداره و پنل های سقفی، پراکندن اجزاء دیگر در PCM جهت بهبود رسانایی و بررسی تغییرات هندسی در انتقال حرارت از جمله این موارد بودند. با توجه به این موارد، در این پژوهش، باتوجه به اثر امیدوارکننده تغییرات هندسی در افزایش انتقال حرارت PCM ارزان بودن این روش، اثر ایجاد تغییرات هندسی در پنل دربردارنده PCM به کار برده شده در سقف یک ساختمان مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه سه پیکربندی نوآورانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

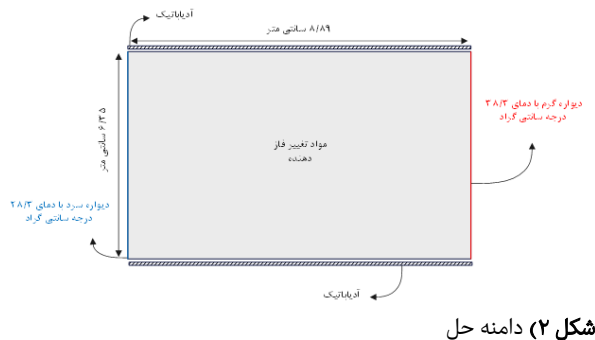
۲- شرح مسئله:

سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) در دیوارهای ساختمان به دلیل وجود تناقض زمانی و مکانی بین عرضه و تقاضای انرژی، مانند ناپیوستگی منبع انرژی خورشیدی و تفاوت بارهای الکتریکی در اوج و غیر اوج، توجه زیادی از سوی جامعه تحقیقاتی جلب کرده اند^[31]. بخش ساختمان بیشترین سهم مصرف انرژی جهانی را به خود اختصاص داده و حدود ۳۰٪ از کل مصرف انرژی را شامل می شود. مصرف انرژی در این بخش از منابع مختلفی مانند تجهیزات و پوشش ساختمان ناشی می شود^[32]. انرژی خورشیدی به دلیل تجدیدپذیر بودن، پایداری و عدم آلودگی، به عنوان یک گزینه بسیار امیدبخش شناخته می شود^[33]. یکی از اولین کاربردهای PCMs برای ذخیره سازی حرارتی در ساختمان ها بوده است (شکل ۱).

یکی از چالش های اساسی و نوظهور در صنعت ساخت و ساز، دستیابی به تعادل میان کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، در عین حفظ و حتی بهبود نیازهای آسایش حرارتی کاربران است. این چالش از آنجا ناشی می شود که ساختمان ها سهم قابل توجهی در مصرف انرژی جهانی و تولید آلاینده های زیست محیطی دارند، و همزمان باید محیطی راحت و ایمن برای ساکنان فراهم کنند. راه حل های نوآورانه ای که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته اند، شامل استفاده از مواد پیشرفته،

مواد تشکیل دهنده ساختمان، همچون استحکام مکانیکی و جذب آب را نیز بهبود می بخشد.

در پژوهشی دیگر لچهب و همکاران^[24] دریافتند که استفاده از PCM در دیوارها می تواند نوسانات دمایی فضای داخلی را کاهش داده و موجب صرفه جویی مؤثر در مصرف انرژی گردد. جیاو و همکاران^[25] به بررسی ترکیب PCM با سایر مواد عملکردی نظیر مواد فتوترمال، عایق های الکترومغناطیسی یا جاذب های صوتی پرداختند تا امکان بهره برداری چندمنظوره از این فناوری در ساختمان ها را فراهم کنند. در مطالعه ای که توسط آلوارز رودریگز و همکاران^[26] صورت گرفت مدلی عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود در کنار الگوریتم ژنتیک برای استخراج ظرفیت حرارتی مؤثر پنل های ماکروکپسوله شده PCM توسعه داده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش جرم PCM در پنل ها (از ۰/۵ کیلوگرم به ۱ کیلوگرم) موجب افزایش ۳۰/۶۵ درصد در ظرفیت حرارتی مؤثر پیک می شود. پیراساکی و سونول^[27] تأثیر اشباع دانه های سبک مانند پومیس با PCM و افزودن آن به ملات ساختمانی را در پنج منطقه اقلیمی ترکیه، جهت بررسی افزایش ظرفیت ذخیره سازی حرارتی اجزای ساختمانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اگرچه صرفه جویی انرژی در سراسر کشور امکان پذیر است، اما میزان آن بسیار ناچیز است؛ به عنوان نمونه، حداکثر صرفه جویی در فصل گرمایش ۰/۵۱ درصد (در ازمیر) و در فصل سرمایش ۱/۷ درصد بوده است. همچنین تحلیل ها نشان دادند که محدوده دمای تغییر فاز مناسب به شدت تحت تأثیر اقلیم، سطح پنجره به دیوار و سطح آسایش حرارتی مورد نظر ساکنین قرار دارد. لی و همکاران^[28] روشی نوآورانه با عنوان PCM متحرک دینامیک معرفی کردند که در آن لایه PCM با تغییر شرایط آب و هوایی، موقعیت خود را درون جداره تغییر می دهد. این سامانه با فشرده سازی یک لایه هوا، امکان حرکت ماده PCM را برای تنظیم بهتر انتقال حرارت فراهم می کند. نتایج این پژوهش نشان داد که دیوارهای مربوط به حالت دینامیک در مقایسه با دیوارهای ایستا یا فاقد PCM، عملکرد به مراتب بهتری در فصول سرد و گرم دارند؛ به طوری که کاهش بار حرارتی در این سیستم بین ۱۳۵/۵۳ تا ۵۳۵/۷۳ درصد در جذب گرما و ۲/۹۲ تا ۵۸/۷۶ درصد در اتلاف گرما متغیر بوده است. رفاهی و همکاران^[29] عملکرد حرارتی یک ساختمان چهار طبقه در شهر تهران با استفاده از دیوارهایی حاوی دولایه PCM با دمای ذوب متفاوت و در ترکیب با لایه عایق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که چیدمان لایه ها بسته به طبقه ساختمان تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی دارد. این مطالعه نشان داد که استفاده از چیدمان های بهینه در هر طبقه منجر به صرفه جویی حدود ۶/۶ درصد در مصرف انرژی گرمایشی و ۲/۸ درصد در انرژی سرمایشی شده است. در مطالعه ای دیگر لی و همکاران^[30] به صورت تجربی، رویکردی نوین با عنوان ادغام دینامیک PCM در جداره ساختمان را ارائه دادند که در آن، لایه PCM



جدول ۱- خواص ماده PCM [34].

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	چگالی (حالت مایع)	6093 Kg/m^3
۲	چگالی (حالت جامد)	6095 Kg/m^3
۳	دمای انجماد	$29/28 \text{ }^\circ\text{C}$
۴	دمای ذوب	$29/78 \text{ }^\circ\text{C}$
۵	دمای اولیه	$28/3 \text{ }^\circ\text{C}$
۶	ضریب انبساط حرارتی	$1/k \times 10^{-4}$
۷	ضریب هدایت حرارتی	32 W/k m
۸	گرمای نهان ذوب	60180 J/Kg
۹	ظرفیت حرارتی ویژه	$381/5 \text{ J/Kg K}$
۱۰	لزجت دینامیکی	$1/81 \times 10^{-3} \text{ Kg/ms}$
۱۱	عدد پراختل	$2/16 \times 10^{-2}$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، نسبت به انتخاب بهینه‌ی آرایش فین‌ها و الگوی انتقال حرارت در مصالح حاوی PCM اقدام نمایند، بدون آنکه نیاز به آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر در مقیاس واقعی باشد.

مدل پایه مورد مطالعه در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده‌است. این مدل یک مستطیل دو بعدی به ابعاد $8/89 \text{ cm}$ در $6/35 \text{ cm}$ می‌باشد که ماده PCM (گالیوم) را در خود جای داده‌است. این محفظه دو بعدی از دو سمت منتهی به دیواره آدیباتیک بوده و از دو سمت دیگر با هوای گرم بیرون ساختمان و هوای خنک درون ساختمان در تعادل می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد مرزی از سیستم که با بیرون در تعادل است و از خورشید گرما دریافت می‌کند دارای دمای ثابت $38/3 \text{ }^\circ\text{C}$ و مرز دیگر دارای دمای ثابت $28/3 \text{ }^\circ\text{C}$ می‌باشد. خواص ماده PCM به‌کار برده شده در جدول ۱ ارائه شده‌است.

این مدل در نرم‌افزار آنسیس ۲۰۲۳ با تعداد ۱۱۰۰۰ المان محاسباتی به صورت ناپایا مورد تحلیل قرار گرفت. تنظیمات حل در این نرم‌افزار به این صورت بود که پس از فعال‌سازی مدل‌های انرژی و مواد تغییر فاز دهنده، مدل توربولانسی مسئله، آرام انتخاب شد و از معادلات مرتبه دوم فشار، اندازه حرکت و انرژی برای گسسته سازی معادلات ناویر-استوکس استفاده گردید. لازم به ذکر است برای کوپل کردن معادلات سرعت و فشار از روش coupled استفاده



شکل (۱) ادغام PCM برای کاربردهای ساختمانی جهت بهره‌مندی از انرژی خورشید [34].

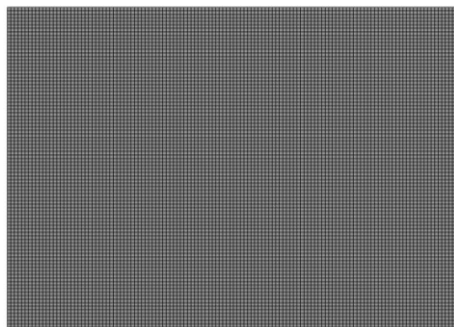
طراحی‌های پایدار و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها است. هدف اصلی این رویکردها، کاهش تأثیرات منفی زیست‌محیطی در کنار ارتقای کیفیت زندگی و رفاه کاربران است. در این زمینه، استفاده از عناصر PCM (مواد تغییر فاز دهنده)، به صورت غیرفعال، در طراحی دیوارهایی که در برابر تابش خورشید قرار دارند، به عنوان راهکاری نوآورانه مورد توجه قرار گرفته است. این عناصر با هدف افزایش اینرسی حرارتی دیوارها و بهبود عملکرد کلی ذخیره و انتقال انرژی حرارتی به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش اثر پدیده تغییر فاز و تغییرات هندسی در محفظه دربردارنده PCM بر فرآیند ذوب برای افزایش ذخیره انرژی احتمالی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- شبیه‌سازی:

در این پژوهش، شرایط مرزی به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بازتاب‌دهنده‌ی یک سناریوی واقعی از عملکرد دیوارهای خارجی یا سقف‌های ساختمان در شرایط اقلیمی گرم و خشک، نظیر شهر تهران، باشند. در این راستا، دمای ثابت $38/3$ درجه سانتی‌گراد برای سطح خارجی محفظه (نماینده‌ی سطحی از سازه که در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد) و دمای ثابت $28/3$ درجه سانتی‌گراد برای سطح داخلی (نماینده‌ی فضای داخلی ساختمان) در نظر گرفته شده است. این انتخاب بر مبنای داده‌های هواشناسی و تحلیل رفتار حرارتی پوسته‌ی خارجی ساختمان‌ها در روزهای تابستان انجام شده و هدف از آن، شبیه‌سازی شرایط واقعی عملکرد مصالح ساختمانی دارای PCM در مواجهه با نوسانات حرارتی روزانه است.

تعیین چنین شرایط مرزی، امکان بررسی دقیق‌تر عملکرد حرارتی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در کاربردهای ساختمانی را فراهم می‌سازد. به‌ویژه در کاربردهایی که شامل ترکیب مصالح تغییر فاز دهنده با اجزای سازه‌ای هستند (مانند دیوارهای دو پوسته، پنل‌های سقفی و یا عناصر پوششی نمای خارجی)، آگاهی از توزیع دما و رفتار حرارتی در حضور شرایط واقعی مرزی، نقش کلیدی در طراحی مؤثر و عملکرد بهینه آن‌ها ایفا می‌کند.

افزون بر آن، بررسی تأثیر عوامل هندسی مانند موقعیت و جهت‌گیری فین‌ها در ساختار داخلی PCM، به عنوان یکی از روش‌های مرسوم برای بهبود تبادل حرارت در این مواد، می‌تواند به درک عمیق‌تری از چگونگی توزیع انرژی حرارتی در سازه منجر شود. این موضوع به طراحان ساختمان اجازه می‌دهد تا با اتکا به



شکل ۴) نمایی از المان‌های محاسباتی ایجاد شده

۳-۳- معادلات حاکم

مسئله حاضر یک مدل ناپایدار جریان دوبعدی انتقال حرارت در طول فرایند ذوب PCM در داخل یک محفظه مستطیلی می‌باشد. در شبیه سازی مسئله مذکور، فرضیات زیر لحاظ گردیده است:

- مسئله به صورت دوبعدی در نظر گرفته می‌شود.
- تمامی خواص ماده تغییر فاز دهنده به جز چگالی ثابت در نظر گرفته شده‌اند.
- سیال نیوتونی و تراکم ناپذیر است.
- اتلافات ناشی از لزجت ناچیز است.
- حرکت سیال در حین فرایند ذوب لایه‌ای است.

معادلات انرژی و ناویر استوکس برای حل میدان‌های هیدرودینامیکی و حرارتی و به صورت گذرا استفاده شد. بنابراین، معادلات حاکم حاصل با در نظر گرفتن اثر گرانش را می‌توان با در نظر گرفتن مفروضات فوق به صورت زیر نوشت^[35]:

- معادله پیوستگی

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

در معادله ۱، ρ نشان دهنده‌ی چگالی سیال و $\vec{u}$ نشان دهنده وکتور سرعت می‌باشد.

- معادله مومنوم

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \beta (T - T_m) \vec{g} \quad (2)$$

در معادله فوق p فشار استاتیک، T دما، T_m دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده، β ضریب انبساط حرارتی حجمی، $\vec{g}$ بردار شتاب گرانش، τ تانسور تنش ویسکوز برای برای یک سیال نیوتونی می‌باشد و توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3)$$

در رابطه فوق μ نشان دهنده لزجت دینامیکی است.

معادله انرژی

آنتالپی مواد به صورت مجموع آنتالپی محسوس h و گرمای نهان ΔH محاسبه می‌شود:

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

که در آن:

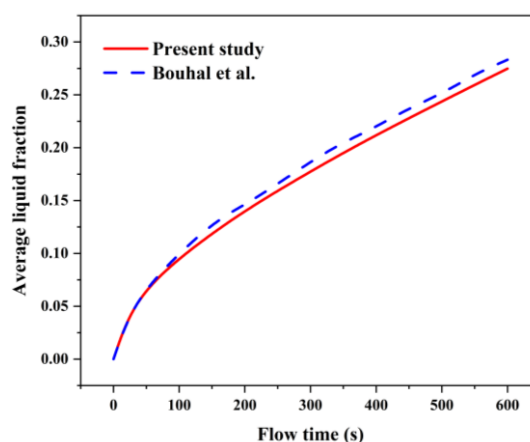
گردید. در نهایت پس از اعتبارسنجی حل در مدل پایه با مرجع اصلی این پژوهش^[34]، مطالعه بر روی اثرات افزودن فین با زوایای مختلف بر روی زمان فرآیند ذوب و افزایش ذخیره انرژی احتمالی مورد تدقیق و بررسی قرار گرفت.

۳-۱- اعتبار سنجی:

جهت اطمینان از اعتبار حل حاضر، نتایج حاصل از تحلیل مسئله در حالت پایه (بدون فین) با حل بوها و همکاران^[34] در حالت پایه مقایسه شد. نتایج مربوط به میزان ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده در مطالعه حاضر و پژوهش یاد شده در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شده که نشان‌دهنده معتبر بودن حل می‌باشد.

۳-۲- استقلال از شبکه:

در دامنه حل مسئله حاضر، ۱۱۰۰۰ المان محاسباتی قرار گرفت تا بتوان علاوه بر دستیابی به حلی دقیق، از طولانی شدن بیش از حد زمان محاسبات نیز دوری کرد. نمایی از این المان‌ها در شکل شماره ۴ نمایش داده شده‌اند. در این مدل پایه ۱۱۰۰۰ المان المان مربعی ایجاد شد و حل این مدل برای تعداد المان ۵۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ نیز تکرار شد تا اطمینان حاصل شود که حل انجام‌شده از شبکه ایجاد شده مستقل می‌باشد. نتایج حل مسئله در حالت پایه برای پارامتر میزان ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده برای تعداد المان‌های مختلف پس از ۶۰۰ ثانیه از شروع حل، در جدول زیر ارائه شده است.



شکل ۳) مقایسه مقدار میانگین کسر حجمی مایع پژوهش حاضر و مطالعه بوها و همکاران

جدول ۲- استقلال از شبکه

ردیف تعداد المان کسر ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده اختلاف			
۱	۵۰۰۰	۰/۲۵۱	-
۲	۸۰۰۰	۰/۲۶۵	۵٪
۳	۱۱۰۰۰	۰/۲۷۲	۲/۶٪
۴	۱۵۰۰۰	۰/۲۷۵	۱٪

ضعیف و عدم وجود مکانیسم‌های مؤثر برای توزیع حرارت در سراسر مخزن است. در حالتی که از فین‌های افقی استفاده شده‌است، می‌توان سریع‌ترین افزایش کسر حجمی مایع را مشاهده کرد. اضافه کردن فین‌های افقی باعث بهبود انتقال حرارت به کل حجم PCM شده و به ذوب سریع و یکنواخت کمک می‌کند. این طراحی امکان بهره‌برداری بیشتر و بهینه‌تر از ظرفیت گرمایی PCM را فراهم می‌کند. در حالتی که از فین‌های زاویه‌دار استفاده شده‌است، نرخ ذوب ماده PCM بیشتر از حالت بدون فین است، اما همچنان به سطح فین‌های افقی نمی‌رسد. زاویه مثبت فین‌ها موجب تقویت جریان همرفتی در نواحی بالایی مخزن شده و به ذوب موضعی در این بخش‌ها کمک می‌کند. زاویه منفی فین‌ها نیز موجب تمرکز جریان حرارتی در نواحی پایینی مخزن شده و نرخ ذوب کمی کمتر از فین‌های افقی و زاویه مثبت است.

در نمودار ب در شکل شماره ۵ که میانگین دما بر حسب زمان حل ارائه شده‌است، در حالت بدون فین که با خط مشکی رنگ نمایش داده شده‌است انتقال حرارت تنها از طریق هدایت طبیعی اتفاق می‌افتد. به همین دلیل، افزایش میانگین دمای مخزن بسیار کند است. نبود فین‌ها باعث می‌شود که توزیع حرارت غیریکنواخت بوده و مناطق دورتر از منبع گرما دیرتر گرم شوند. در حالتی که از فین‌های افقی استفاده شده‌است، بیشترین میانگین دما در مدت زمان مشخص قابل مشاهده است. وجود فین‌های افقی باعث افزایش سطح تماس میان PCM و گرما شده و انتقال حرارت به‌صورت یکنواخت در سراسر مخزن اتفاق می‌افتد. این نوع طراحی، جریان همرفتی را تقویت کرده و به گرم شدن سریع‌تر ماده کمک می‌کند. در حالتی که از فین‌های زاویه‌دار استفاده شده‌است، دما نسبت به فین‌های افقی کمی کمتر است، اما همچنان بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بدون فین دارد. زاویه مثبت فین‌ها باعث می‌شود که گرما بیشتر به نواحی بالایی مخزن هدایت شود و توزیع حرارت در این مناطق بهبود یابد. زاویه منفی فین‌ها نیز باعث می‌شود انتقال حرارت به سمت پایین مخزن متمرکز شده و این امر باعث تجمع گرما در بخش پایینی مخزن می‌شود و عملکرد کمی کمتر از فین‌های افقی را موجب می‌گردد. در شکل شماره ۶، کانتورهای کسر حجمی مایع بر حسب زمان حل ارائه شده‌است. در کانتورهای دارای فین با زاویه ۳۰+ درجه، ذوب ماده PCM از نزدیکی منبع حرارت شروع شده و به‌طور عمده در نواحی بالایی مخزن پیشروی می‌کند. زاویه مثبت فین‌ها جریان حرارت را به سمت بالا تقویت کرده و موجب تمرکز بیشتر گرما در این نواحی می‌شود. با گذشت زمان ذوب به نواحی پایینی گسترش می‌یابد، اما همچنان ذوب در نواحی بالایی غالب است. جریان همرفتی ناشی از زاویه مثبت فین‌ها موجب تسریع ذوب در بخش‌های فوقانی می‌شود. در انتهای حل، بیشتر ماده PCM ذوب شده است، اما ذوب نواحی پایینی نسبت به نواحی بالایی ناقص‌تر است. این مسئله به دلیل تمرکز بیشتر گرما در قسمت‌های بالایی است.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T_s} C_p dT \quad (5)$$

در رابطه فوق h_{ref} نشان دهنده آنتالپی مرجع، T_{ref} دمای مرجع، T_s دمای ماده تغییر فاز دهنده جامد، و C_p گرمای ویژه در فشار ثابت است. کسر مایع، f ، نیز توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} f = 0 & \text{if: } T < T_s \\ f = 1 & \text{if: } T > T_l \\ f = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{if: } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (6)$$

اکنون می‌توان محتوای گرمای نهان را بر حسب گرمای نهان ماده (L_f) نوشت:

$$\Delta H = f L_f \quad (7)$$

محتوای گرمای نهان می‌تواند بین صفر (برای جامد) و L_f (برای مایع) متفاوت باشد.

برای مسئله ذوب، معادله انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود^[34]:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (8)$$

جایی که λ هدایت حرارتی سیال و H آنتالپی است. تکنیک آنتالپی-تخلخل، ناحیه خمیری (منطقه نیمه جامد) را به عنوان یک محیط متخلخل در نظر می‌گیرد. تخلخل در هر سلول برابر با کسر مایع در آن سلول تنظیم می‌شود. در مناطق کاملاً جامد تخلخل برابر با صفر است که سرعت این نواحی را صفر می‌کند. مقدار S در رابطه فوق به دلیل کاهش تخلخل در ناحیه خمیری، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

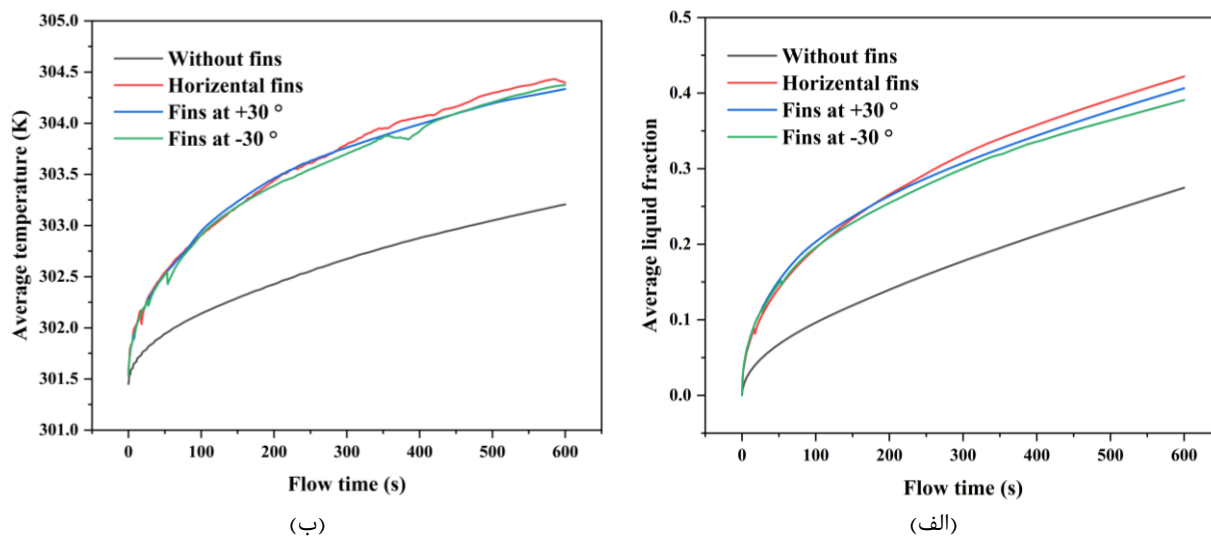
$$S = \frac{(1-f)^2}{(f^3 + \epsilon)} A_{mush} (\vec{u} + \vec{u}_p) \quad (9)$$

که در آن، f کسر حجمی مایع، ϵ یک مقدار کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج، A_{mush} ثابت ناحیه خمیری و $\vec{u}_p$ سرعت جامد ناشی از بیرون کشیدن مواد منجمد شده از حوزه است.

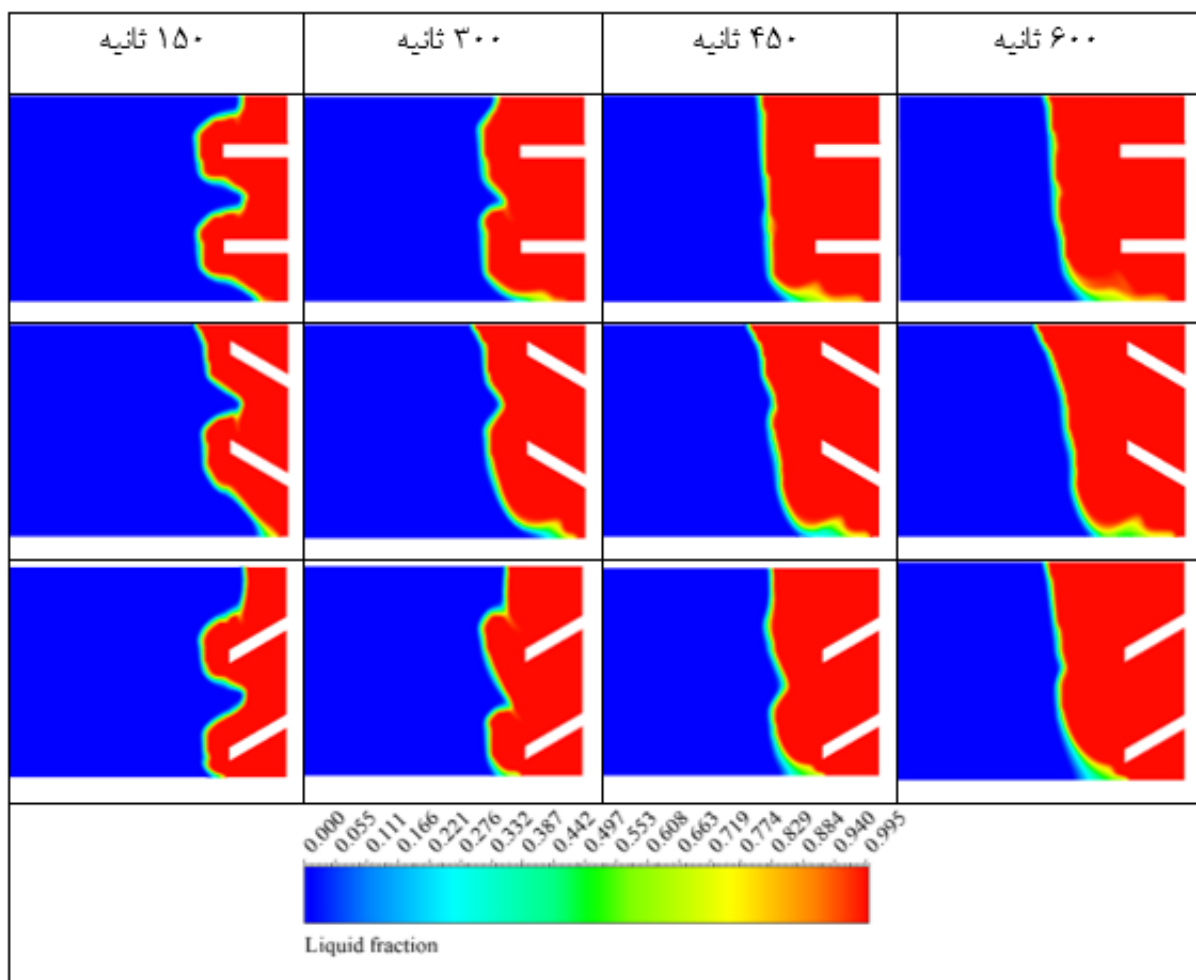
۴- تحلیل نتایج

در این پژوهش اثر پدیده تغییر فاز و تغییرات هندسی در محفظه دربردارنده PCM بر فرآیند ذوب برای افزایش ذخیره انرژی احتمالی مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت نتایج حاصل از حل، ارائه شده و مورد تحلیل و واکاوی قرار گرفته‌اند. نتایج این بخش شامل نمودارها و کانتورهای مربوط به کسر جرمی مایع و دما در دامنه حل می‌باشد. در ابتداء نمودارهای مربوط به میانگین دما و کسر حجمی مایع برای چهار حالت ارائه شده‌است.

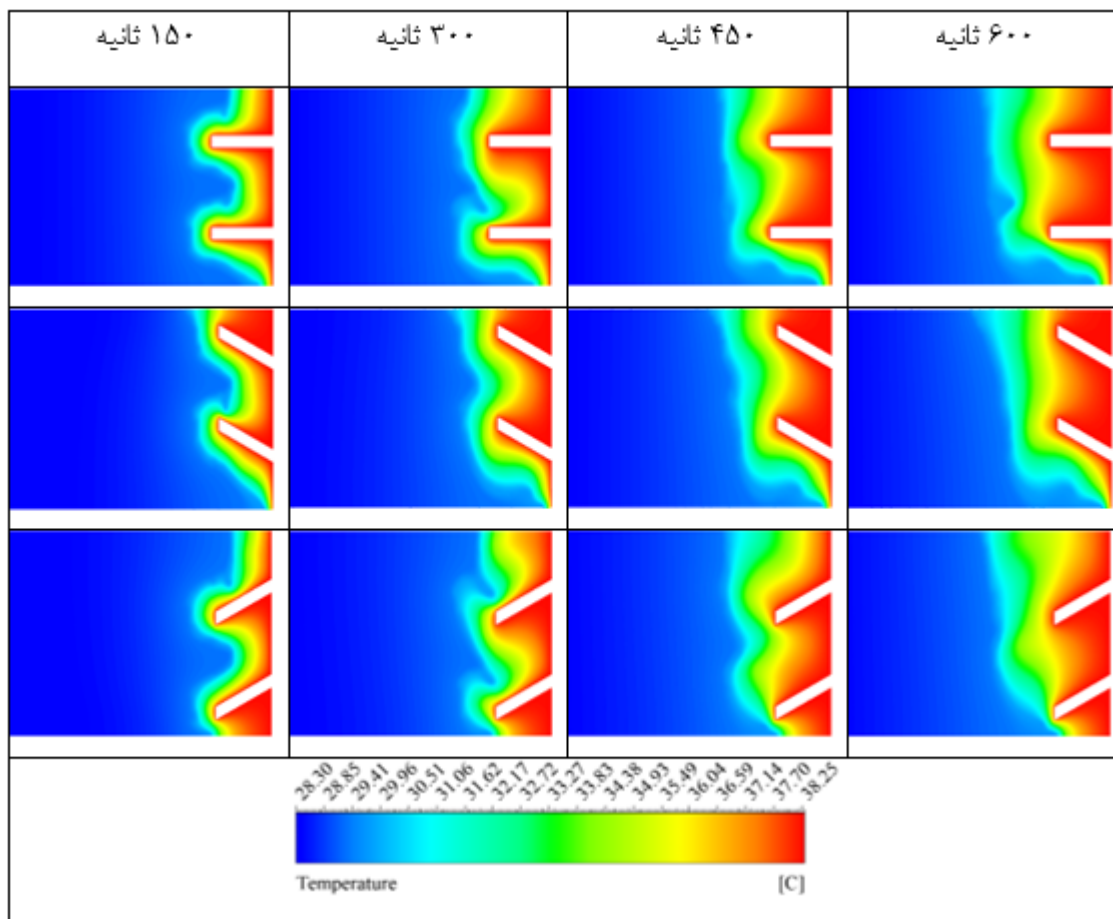
در نمودار الف در شکل شماره ۵ که میانگین کسر حجمی مایع بر حسب زمان حل ارائه شده‌است، در حالت بدون فین که با خط مشکی رنگ نمایش داده شده‌است، نرخ افزایش کسر مایع بسیار کند است. این نشان می‌دهد که در حالت بدون فین، ذوب ماده PCM به‌کندی اتفاق می‌افتد. این امر ناشی از انتقال حرارت



شکل ۵) نمودار میانگین دما و کسر حجمی بر حسب زمان حل



شکل ۶) کانتور کسر حجمی در هندسه‌ها و زمان‌های مختلف



شکل ۷) کانتور دما در هندسه‌ها و زمان‌های مختلف

در شکل شماره ۷، کانتورهای دما بر حسب زمان حل ارائه شده‌است. این کانتورهای دمایی، توزیع دما در مخزن حاوی ماده تغییر فاز دهنده (PCM) را در زمان‌های مختلف (۱۵۰، ۳۰۰، ۴۵۰، و ۶۰۰ ثانیه) نشان می‌دهند. سه حالت هندسی شامل فین‌های زاویه‌دار (۳۰+ درجه و ۳۰- درجه) و فین‌های افقی بررسی شده است. رنگ‌بندی (از آبی به قرمز) نشان‌دهنده دمای محیط است که رنگ قرمز دمای بالاتر و رنگ آبی دمای پایین‌تر را نشان می‌دهد. در کانتورهای دارای فین با زاویه ۳۰+ درجه، انتقال حرارت به سمت بالا هدایت شده و توزیع دما در نزدیکی منبع گرما و بالای فین بیشتر است. این وضعیت ناشی از زاویه مثبت فین است که جریان همرفتی را در جهت بالایی تقویت می‌کند. با گذشت زمان توزیع دما به‌طور قابل توجهی به نواحی بالایی گسترش یافته است. مناطق نزدیک فین‌ها گرم‌تر از نواحی دیگر هستند و اختلاف دما در نواحی بالایی بیشتر مشهود است. در انتهای حل نیز دما به بخش عمده‌ای از مخزن منتقل شده، اما همچنان نواحی بالایی دمای بیشتری نسبت به پایین دارند. این عدم یکنواختی در دما به دلیل هدایت گرما به سمت بالاست.

در کانتورهای دارای فین‌های افقی، انتقال حرارت به‌صورت متوازن در اطراف فین‌ها صورت گرفته و دمای نواحی نزدیک به آن‌ها افزایش یافته است. این طراحی موجب توزیع یکنواخت‌تر دما در

در کانتورهای دارای فین افقی، فرآیند ذوب به‌طور یکنواخت در نزدیکی فین‌ها آغاز می‌شود. طراحی افقی فین‌ها موجب انتقال حرارت مؤثر به تمام عرض مخزن شده و نواحی بیشتری را درگیر ذوب می‌کند. با گذشت زمان ذوب در بیشتر مخزن به‌صورت یکنواخت گسترش یافته است. این یکنواختی ناشی از تقویت جریان همرفتی و توزیع متوازن گرما به تمام نواحی PCM است. در انتهای حل، بخش قابل توجهی از ماده PCM به‌طور یکنواخت ذوب شده است. این نشان‌دهنده کارایی بالای طراحی افقی در انتقال حرارت و بهبود یکنواختی ذوب است.

در کانتورهای دارای فین با زاویه ۳۰- درجه، ذوب از نواحی پایین مخزن شروع شده و به دلیل تمرکز گرما در این قسمت‌ها، سرعت بیشتری نسبت به نواحی بالا دارد. زاویه منفی فین‌ها موجب تجمع گرما در نزدیکی نواحی پایینی شده است. با گذشت زمان فرآیند ذوب به نواحی بالاتر گسترش می‌یابد، اما همچنان نواحی پایینی بیشترین میزان ذوب را نشان می‌دهند. این عدم یکنواختی در توزیع حرارت ممکن است برای کاربردهایی که به تمرکز گرما در پایین نیاز دارند مفید باشد. در انتهای حل، اگرچه بخش عمده‌ای از PCM ذوب شده است، اما یکنواختی فرآیند ذوب کمتر از سایر حالت‌ها، به‌ویژه فین‌های افقی، است.

در نهایت، انتخاب نوع و زاویه فین‌ها باید بر اساس نیازهای کاربردی و شرایط عملیاتی سیستم انجام شود. برای کاربردهایی که نیاز به توزیع یکنواخت گرما و عملکرد کلی بهتر دارند، فین‌های افقی بهترین گزینه هستند، در حالی که برای شرایط خاص، فین‌های زاویه‌دار ممکن است گزینه بهتری باشند. این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی فین تأثیر بسزایی در عملکرد حرارتی و کارایی مخازن PCM دارد و باید به دقت متناسب با نیاز سیستم انتخاب شود.

۶- پیشنهادات جهت تحقیقات آتی:

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، زمینه‌های مختلفی برای گسترش و تکمیل مطالعات در حوزه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با استفاده از PCM و فین‌های حرارتی وجود دارد. در گام بعدی، توسعه مدل عددی از حالت دویعدی به سه‌بعدی می‌تواند موجب افزایش دقت شبیه‌سازی و بررسی اثرات فضایی دقیق‌تری در طراحی هندسه فین‌ها شود. همچنین، در نظر گرفتن تغییرات زمانی دما و شبیه‌سازی چرخه‌های روزانه (روز و شب) می‌تواند به تحلیل عملکرد سامانه در شرایط واقعی‌تر منجر گردد. از سوی دیگر، ترکیب مواد PCM با نانومواد نظیر گرافن یا نانولوله‌های کربنی، به‌منظور بهبود ضریب هدایت حرارتی و ارزیابی تأثیر آن در کنار طراحی هندسی فین‌ها، از موضوعات پیشنهادی ارزشمند برای مطالعات آینده است. انجام آزمایش‌های تجربی و ساخت نمونه‌های فیزیکی از پیکربندی‌های ارائه‌شده، می‌تواند نقش مهمی در اعتبارسنجی مدل عددی و کاربردی‌سازی نتایج ایفا کند. همچنین بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه به منظور تعیین آرایش بهینه فین‌ها با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر حداکثر نرخ ذوب، یکنواختی دما، و کاهش هزینه‌های اجرایی، می‌تواند به طراحی مهندسی دقیق‌تری منجر شود. در نهایت، بررسی عملکرد سیستم در اقلیم‌های مختلف و شرایط آب‌وهوایی گوناگون (نظیر مناطق سردسیر یا مرطوب) به منظور ارزیابی گستره کاربرد آن در مناطق متنوع جغرافیایی، پیشنهاد می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews. 2009 Feb 1;13(2):318-45.
- 2- Farid M, Khudhair AM, Razack SA, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. Thermal Energy Storage with Phase Change Materials. 2021 Jul 25:4-23.

کل عرض مخزن می‌شود. با گذشت زمان، دما به‌صورت یکنواخت‌تر در سراسر مخزن گسترش یافته است. جریان همرفتی ایجاد شده به دلیل طراحی افقی فین‌ها باعث توزیع متعادل‌تر گرما در کل مخزن شده است. در انتهای حل نیز دما به‌طور قابل توجهی در سراسر مخزن یکنواخت شده است. این حالت نشان‌دهنده عملکرد مؤثر فین‌های افقی در توزیع گرما و کاهش اختلاف دما است.

در کانتورهای دارای فین با زاویه ۳۰- درجه، دما در نواحی پایینی فین متمرکز شده و انتقال حرارت به سمت پایین تقویت شده است. این وضعیت ناشی از زاویه منفی فین‌هاست که باعث تمرکز گرما در نواحی پایینی مخزن می‌شود. به تدریج توزیع دما به نواحی بالایی نیز گسترش یافته است، اما نواحی پایینی همچنان گرم‌تر از سایر بخش‌ها هستند. در انتهای حل مشاهده می‌شود که توزیع دما در نواحی پایینی بسیار بیشتر از نواحی بالایی است. این طراحی برای کاربردهایی که نیاز به تمرکز گرما در بخش پایینی دارند مناسب است، اما یکنواختی کمتری در کل مخزن مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری:

در این پژوهش اثر ایجاد تغییرات هندسی با افزودن فین‌های افقی و زاویه‌دار در مخزن دربردارنده PCM بر فرآیند ذوب برای افزایش ذخیره انرژی احتمالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

اضافه کردن فین‌ها به مخازن PCM تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد حرارتی و نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده دارد. فین‌ها با افزایش سطح تماس و تقویت جریان همرفتی، موجب می‌شوند که گرما سریع‌تر و یکنواخت‌تر به ماده منتقل شود. در این میان، فین‌های افقی به دلیل یکنواختی در انتقال حرارت و تسریع فرآیند ذوب، بهترین گزینه برای طراحی مخازن با عملکرد بالا هستند. این نوع فین‌ها برای کاربردهایی که نیاز به ذوب کامل و یکنواخت در تمام نواحی مخزن دارند، ایده‌آل هستند.

در مقابل، فین‌های زاویه‌دار، چه با زاویه مثبت و چه با زاویه منفی، برای کاربردهایی مناسب هستند که نیاز به تمرکز گرما در نواحی خاص دارند. فین‌های با زاویه ۳۰+ درجه نواحی بالایی مخزن را سریع‌تر گرم کرده و برای کاربردهایی که انتقال حرارت به نواحی بالا اهمیت دارد مناسب هستند. از سوی دیگر، فین‌های با زاویه ۳۰- درجه گرما را به نواحی پایین‌تر متمرکز کرده و برای طراحی‌هایی که نیاز به ذوب در بخش‌های پایینی دارند، کارآمد هستند. در این پژوهش، مشاهده شد که میانگین کسر حجمی مایع برای مخزن حاوی PCM در حالت بدون فین، با فین افقی، با فین با زاویه ۳۰+ درجه و فین با زاویه ۳۰- به ترتیب مقادیر ۰/۲۷، ۰/۴۲، ۰/۴ و ۰/۳۹ را به خود اختصاص داد. همچنین مقادیر دمای میانگین مخزن حاوی PCM برای حالت‌های بدون فین، با فین افقی، با فین با زاویه ۳۰+ درجه و فین با زاویه ۳۰- به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۹۴، ۰/۹۲ و ۰/۹۳ محاسبه شدند.

- thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*. 2009 Sep 1;83(9):1509-20.
- 18- Jaguemont J, Omar N, Van den Bossche P, Mierlo J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied thermal engineering*. 2018 Mar 5;132:308-20.
- 19- Zavrl E, Tomc U, El Mankibi M, Dovjak M, Stritih U. Parametric study of an active-passive system for cooling application in buildings improved with free cooling for enhanced solidification. *Sustainable Cities and Society*. 2023 Dec 1;99:104960.
- 20- Mehrpooya M, Mirmotahari SR, Ghafoorian F, Karimkhani M, Ganjali MR. Investigation of a packed bed energy storage system with different PCM configurations and heat transfer enhancement with fins using CFD modeling. *Chemical Papers*. 2024 Feb;78(4):2453-67.
- 21- Barthwal M, Dhar A, Powar S. Effect of nanomaterial inclusion in phase change materials for improving the thermal performance of heat storage: A review. *ACS Applied Energy Materials*. 2021 Aug 2;4(8):7462-80.
- 22- Wang P, Liu Z, Liu R, Zhang F, Zhang L. Energy flexibility of PCM-integrated building: Combination parameters design and operation control in multi-objective optimization considering different stakeholders. *Energy*. 2023 Apr 1;268:126753.
- 23- Pundienė I, Pranckevičienė J, Bumanis G, Šinka M, Bajare D. Experimental investigation of novel bio-composite with integrated phase change materials (PCM) for enhanced energy saving in buildings. *Industrial Crops and Products*. 2025 Feb 1;224:120318.
- 24- Lachheb M, Younsi Z, Youssef N, Bouadila S. Enhancing building energy efficiency and thermal performance with PCM-Integrated brick walls: A comprehensive review. *Building and Environment*. 2024 Apr 4:111476.
- 25- Jiao K, Lu L, Zhao L, Wang G. Towards Passive Building Thermal Regulation: A State-of-the-Art Review on Recent Progress of PCM-Integrated Building Envelopes. *Sustainability*. 2024 Jul 29;16(15):6482.
- 26- Alvarez-Rodriguez M, Alonso-Martinez M, Suarez-Ramon I, García-Nieto PJ. Numerical model for determining the effective heat capacity of macroencapsulated PCM for building applications. *Applied Thermal Engineering*. 2024 Apr 1;242:122478.
- 27- Pirasaci T, Sunol A. Potential of phase change materials (PCM) for building thermal performance enhancement: PCM-composite aggregate application throughout Turkey. *Energy*. 2024 Apr 1;292:130589.
- 28- Li W, Rahim M, Wu D, El Ganaoui M, Bennacer R. Dynamic integration of phase change material in walls for enhancing building thermal performance—A novel self-adaptive method for moving PCM layer. *Energy Conversion and Management*. 2024 May 15;308:118401.
- 29- Refahi A, Rostami A, Amani M. Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position. *Journal of Energy Storage*. 2024 Mar 30;82:110556.
- 3- Hawlader MN, Uddin MS, Khin MM. Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. *Applied energy*. 2003 Jan 1;74(1-2):195-202.
- 4- El Majd A, Sair S, Ait Ousaleh H, Berardi U, Moulakhnif K, Belouaggadia N, Younsi Z, El Bouari A. Advancing PCM research in building efficiency: a comprehensive investigation into PCM selection and critical integration strategies. *Journal of Building Engineering*. 2024 Aug 18:110485.
- 5- Ling TC, Poon CS. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*. 2013 Sep 1;46:55-62.
- 6- Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*. 2003 Feb 1;23(3):251-83.
- 7- Izquierdo-Barrientos MA, Belmonte JF, Rodríguez-Sánchez D, Molina AE, Almendros-Ibáñez JA. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM). *Applied Thermal Engineering*. 2012 Dec 5;47:73-85.
- 8- Alam M, Jamil H, Sanjayan J, Wilson J. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. *Energy and Buildings*. 2014 Aug 1;78:192-201.
- 9- Zhou D, Zhao CY, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied energy*. 2012 Apr 1;92:593-605.
- 10- Refahi A, Rostami A, Amani M. Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position. *Journal of Energy Storage*. 2024 Mar 30;82:110556.
- 11- Cabeza LF, Castell A, Barreneche CD, De Gracia A, Fernández AI. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011 Apr 1;15(3):1675-95.
- 12- Ali AA, Lafta DA, Noori SW, Abdulmir F, Rashid FL. Innovative materials integrated with PCM for enhancing photovoltaic panel efficiency: An experimental investigation. *Journal of Energy Storage*. 2024 Nov 20;102:114258.
- 13- Cabeza LF, Martorell I, Miró L, Fernández AI, Barreneche C. Introduction to thermal energy storage (TES) systems. In *Advances in thermal energy storage systems* 2015 Jan 1 (pp. 1-28). Woodhead Publishing.
- 14- Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*. 2003 Feb 1;23(3):251-83.
- 15- Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Norton B. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar energy*. 2010 Sep 1;84(9):1601-12.
- 16- El Khadraoui A, Bouadila S, Kooli S, Farhat A, Guizani A. Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of cleaner production*. 2017 Apr 1;148:37-48.
- 17- Agyenim F, Eames P, Smyth M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature

- 30- Li W, Rahim M, Wu D, El Ganaoui M, Bennacer R. Experimental study of dynamic PCM integration in building walls for enhanced thermal performance in summer conditions. *Renewable Energy*. 2024 Dec 1;237:121891.
- 31- Pasupathy A, Velraj R, Seeniraj RV. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008 Jan 1;12(1):39-64.
- 32- "The Scientific and Technical Centre for Building." Accessed: Jan. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.cstb.fr/>
- 33- Bouhal T, Agrouaz Y, El Rhafiki T, Kousksou T, Zeraouli Y, Jamil A. Technical assessment, economic viability and investment risk analysis of solar heating/cooling systems in residential buildings in Morocco. *Solar Energy*. 2018 Aug 1;170:1043-62.
- 34- Bouhal T, Meghari Z, El Rhafiki T, Kousksou T, Jamil A, Ghoulam EB. Parametric CFD analysis and impact of PCM intrinsic parameters on melting process inside enclosure integrating fins: Solar building applications. *Journal of Building Engineering*. 2018 Nov 1;20:634-46.
- 35- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons; 1995 Dec 12.