Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

Vol. 7, No.4
page 63-93 ,winter 2023

A comprehensive review on the application of nanoparticles in the matrix of phase change materials to improve thermal properties for energy management and storage

Zahra Mohammadi[1], Nasrin Etesami[2,*], Faezeh Rostamian[3], Majid Haghgoo[4]

1. M.Sc. student of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology
2. Professor of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology
3. Ph.D. of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology
4. Associate Professor of Polymer Engineering, Iran Space Institute, Tehran, Iran

Abstract

Given the ever-increasing demand for energy and the limited nature of fossil fuel resources, improving energy efficiency and storage has become one of the most significant challenges facing humanity. Phase Change Materials (PCMs), substances capable of absorbing and releasing thermal energy at a constant temperature, have emerged as an innovative solution in the field of energy storage. With their high latent heat capacity, ability to maintain a stable temperature, and environmental friendliness, PCMs have great potential for applications in various industries. However, their low thermal conductivity, especially in organic PCMs, has hindered their widespread use. To address this challenge, researchers have been exploring various methods to enhance the thermal properties of PCMs. One of the most effective approaches involves incorporating high thermal conductivity nanoparticles into the PCM matrix. This research comprehensively reviews recent advancements in the preparation and applications of nanoparticle-enhanced PCMs. It delves into various types of nanoparticles used, production methods for nanocomposites, the impact of nanoparticles on the thermal and mechanical properties of PCMs, the stabilization of nanocomposites with surfactants and surface modification, and also their potential applications in diverse industries. The results of this study indicate that the use of nanoparticles can significantly improve the thermal conductivity of PCMs, with carbon-based nanofillers showing the highest impact. Additionally, nanoparticles have led to a relative reduction in the phenomenon of supercooling in PCMs. Based on the results of numerous studies, nanoparticle-enhanced PCMs hold great promise for improving the performance of energy storage systems, reducing energy consumption in various industries, and fostering the development of sustainable technologies. These nanocomposites can be employed in the construction, automotive, electronics, and textile industries to create more comfortable environments, enhance energy efficiency, and reduce greenhouse gas emissions. Continued research in this field is expected to lead to the development of even more efficient PCMs with a broader range of applications.

key words

Phase change materials

Nanoparticles

Thermal conductivity

Thermal performance

Nanocomposite stability

*To whom correspondence should be addressed:
netesami@iut.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

مروری جامع برکاربرد نانوذرات در زمینهٔ مواد تغییرفازدهنده با هدف بهبود خواص گرمایی برای مدیریت و ذخیره‌سازی انرژی

زهرا محمدی[۱]، نسرین اعتصامی[۲،*]، فائزه رستمیان[۳]، مجید حقگو[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- دکترای مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴- دانشیار مهندسی پلیمر، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته ای
سال هفتم، شماره ۴، نسخه ۱
زمستان ۱۴۰۲ ، صفحه ۹۳-۶۳

چکیـــده

با توجه به افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی و محدودیت منابع فسیلی، بهره‌وری انرژی و ذخیره‌سازی آن به یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر تبدیل شده است. مواد تغییرفازدهنده (PCMها) به عنوان موادی که قابلیت جذب و آزادسازی انرژی گرمایی را در دمای ثابت دارند، به عنوان راهکاری نوآورانه در حوزهٔ ذخیره‌سازی مطرح شده‌اند. این مواد با ظرفیت گرمایی نهان بالا، قابلیت حفظ دمای محیط در بازهٔ مشخص و سازگاری با محیط‌زیست، قابلیت بالایی برای به‌کارگیری در صنایع مختلف دارند. با این حال، پایین بودن رسانایی گرمایی، به ویژه در PCMهای آلی، مانع از کاربرد گستردهٔ آن‌ها شده است. برای رفع این چالش، پژوهشگران به دنبال راهکارهایی برای بهبود خواص گرمایی PCMها هستند. یکی از مؤثرترین روش‌ها، افزودن نانوذرات با رسانایی گرمایی بالا به ساختار PCMهاست. در این پژوهش، ضمن بررسی مزایا و چالش‌های استفاده از PCMها، به‌طور جامع به پیشرفت‌های اخیر در زمینهٔ تهیه و کاربرد نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است. انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده، روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌ها، تأثیر نانوذرات بر خواص گرمایی و مکانیکی PCMها، پایدارسازی نانوکامپوزیت‌ها به کمک سطح‌فعال‌ها و اصلاح سطح و نیز کاربردهای بالقوه آن‌ها در صنایع مختلف، از جمله مواردی است که در این پژوهش مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رسانایی گرمایی PCMها را بهبود بخشد که در این میان نانوافزودنی‌های کربنی بالاترین تأثیر را نشان داده‌اند. همچنین نانوذرات باعث کاهش نسبی پدیدهٔ اَبَرسرمایش در PCM ها شده‌اند. با توجه به نتایج تحقیقات انجام‌شده، نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده قابلیت بالایی برای بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف و توسعهٔ فناوری‌های پایدار دارند. این نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند در صنایع ساختمان، خودرو، الکترونیک و نساجی برای ایجاد محیط‌های راحت‌تر، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. با ادامهٔ پژوهش‌ها در این زمینه، می‌توان به توسعهٔ مواد تغییرفازدهنده با کارایی بالاتر و کاربردهای گسترده‌تر امیدوار بود.

کلمـات کلیـدی

مواد تغییرفازدهنده

نانوذرات

رسانایی گرمایی

عملکرد گرمایی

پایداری نانوکامپوزیت

*مسئول مکاتبات:
netesami@iut.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

۱ مقدمه

افزایش سطح آلاینده‌های زیست‌محیطی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و در نتیجه بالا رفتن قیمت آن‌ها، از جمله دلایل مهم توسعهٔ منابع انرژی تجدیدپذیر است. ذخیرهٔ انرژی نه‌تنها موجب ایجاد توازن میان عرضه و تقاضا می‌شود، بلکه سبب بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سامانه‌های انرژی شده و نقش ویژه‌ای در صرفه‌جویی مصرف انرژی ایجاد می‌کند؛ از این رو اهمیت توسعهٔ تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی کمتر از یافتن منابع جدید انرژی نیست (۱). روش‌های گوناگونی برای ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد که در دسته‌بندی‌های مختلفی ازجمله ذخیرهٔ انرژی مکانیکی، ذخیرهٔ انرژی الکتریکی و همچنین ذخیرهٔ انرژی گرمایی ارائه شده است (۲). انرژی گرمایی یکی از مهم‌ترین اشکال انرژی مورد استفاده در فرایندهای زندگی روزمره و بخش‌های تجاری، صنعتی و کشاورزی است. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را می‌توان به دو دستهٔ کلی روش‌های فیزیکی (ذخیره‌سازی گرمای نهان و محسوس) و شیمیایی تقسیم کرد. با توجه به بالا بودن ظرفیت گرمای نهان هر ماده نسبت به ظرفیت گرمای محسوس آن، در بسیاری از سامانه‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی از قابلیت تغییر فاز مواد مشخص به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود (۱).

در این راستا می‌توان به خانواده‌ای از مواد شیمیایی به نام مواد تغییرفازدهنده (Phase Change Materials) به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی اشاره کرد که توانایی بالایی در جذب و آزادسازی انرژی به‌وسیلهٔ گرمای نهان دارند (۳،۴). پژوهش‌های زیادی در مورد کاربرد PCMها برای ذخیرهٔ انرژی گرمایی وجود دارد (۵–۹). به‌طور کلی PCMها بر اساس ساختار شیمیایی به مواد آلی، معدنی و یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند (۱۰). در این میان مواد تغییرفازدهندهٔ آلی به‌دلیل دارا بودنِ خواص مطلوبی مانند رفتار ذوب یا انجماد سازگار، اَبَرسرمایش (Supercooling) کم، فشار بخار کمتر در دمای عملیاتی، عدم سمیت و دسترسی آسان، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۱،۱۲). اما شایع‌ترین مشکل مواد تغییرفازدهندهٔ آلی، رسانایی گرمایی کم آن‌هاست که باعث می‌شود فرایند جذب و آزادسازی انرژی در طول مدت تغییر فاز ماده، با سرعت کمتری انجام شود. لذا برای اینکه مواد تغییرفازدهندهٔ آلی در ذخیره‌سازی انرژی کارآمد باشند، تلاش‌های مختلفی برای افزایش رسانایی گرمایی و بالا بردن سرعت انتقال گرما در این مواد انجام شده و همچنان در دست پژوهش است (۱۳). از جمله این روش‌ها می‌توان به افزودن ساختارهای فلزی(Metal Structures) ، الیاف و اسفنج‌های کربنی (Carbon Fibers and Foams)، استفاده از شبکه‌های متخلخل و مواد نانوساختار که می‌تواند موجب افزایش ضریب انتقال گرما و سرعت پاسخ‌دهی این مواد شود، اشاره کرد. در این میان افزودن مواد نانوساختار بر بهبود ضریب انتقال گرمای رسانش PCMها بسیار تأثیرگذار است. اما به کارگیری این روش وابسته به یافتن راه‌حلی برای پراکنده ساختن کامل نانوذرات در زمینهٔ پایه و جلوگیری از کلوخگی و ته‌نشست این مواد است. همچنین با توجه به اینکه PCMها در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به‌طور دائم در معرض فرایندهای ذوب و انجماد متناوب قرار دارند، باید افزون بر پایداری فیزیکی، از پایداری گرمایی و شیمیایی قابل‌قبولی برخوردار باشند (۱).

پژوهشگران متعددی افزودن نانوذرات (Nanoparticles) به PCMها را به‌عنوان یکی از آشکارترین و کارآمدترین روش‌ها برای بهبود رسانایی گرمایی مواد تغییرفازدهنده پیشنهاد کردند. افزودن نانوذرات می‌تواند رسانایی گرمایی را به‌طور مؤثری افزایش دهد اما در عین حال ممکن است تأثیر نامطلوبی بر خواص ترموفیزیکی مانند دمای نقطهٔ ذوب، گرمای نهان و گرانروی داشته باشد (۱۴). بنابراین، درک کامل تأثیر نانوذرات بر خواص ترموفیزیکی، پایداری و عملکرد گرمایی ضروری است.

با توجه به اهمیت PCMها، استفادهٔ گسترده از آن‌ها در صنایع مختلف و وجود پژوهش‌های متعدد در این زمینه لازم است که بررسی جامع و همه جانبه‌ای در رابطه با مزایا و چالش‌های به‌کارگیری نانوذرات در زمینهٔ PCM با هدف افزایش خواص گرمایی آن‌ها صورت گیرد. از آنجایی که اکثر بررسی‌های انجام‌شده تاکنون، پیرامون این موضوع، به‌صورت موردی و پراکنده بوده و در موارد بسیار محدودی با دید کلی موضوع مورد بررسی قرار گرفته است، لازم است تا پژوهشی کامل و فراگیر در این‌باره به عمل آید. بنابراین مقالهٔ مروری حاضر، با هدف بررسی گستردهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده (Nanocomposites of PCMs) در دههٔ گذشته و جمع‌آوری اطلاعات و پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه و مقایسه عملکرد آن‌ها در کنار یکدیگر نگاشته شده است. بخش‌های مختلف این مقاله که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود، شامل: تعریف نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، بررسی روش‌های تهیه و ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، معرفی انواع نانوافزودنی‌ها، بررسی اثر افزودن مواد نانوساختار بر رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌ها، پدیدهٔ اَبَرسرمایش و نیز پایداری آن‌ها و زمینه‌های مختلف کاربرد این مواد است.

۲ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده از پراکنش نانوذرات مختلف با رسانایی گرمایی بالا در مادهٔ تغییرفازدهندهٔ اولیه به عنوان زمینهٔ پایه، به‌منظور افزایش خواص گرمایی به‌دست می‌آیند. نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده ویژگی‌های

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

گرمایی قوی‌تری نسبت به مادهٔ تغییر فازدهندهٔ اولیه نشان می‌دهند. نکتهٔ قابل‌اهمیت در تهیهٔ این مواد پراکنش یکنواخت نانوذرات در زمینهٔ پایه و بررسی پایداری آن‌هاست. پژوهش‌های بسیاری در زمینهٔ تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده وجود دارد که با به‌کارگیری نانوذرات مختلف از جمله نانوذرات اکسید فلزی، نانوذرات فلزی و نانوذرات کربنی و گرافیتی در دههٔ گذشته صورت گرفته است. افزایش رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، به نوع نانوذره افزوده‌شده، نسبت جرمی بهینه، نسبت ابعاد آن و در صورت استفاده از سطح‌فعال (Surfactant) به‌منظور عدم تجمع نانوذرات درون زمینهٔ پایه، به نوع و غلظت سطح‌فعال مصرفی نیز بستگی دارد.

افزایش رسانایی گرمایی PCMها به کمک افزودن نانوذرات به زمینهٔ پایه مسئلهٔ بسیار مهمی تلقی می‌شود. بنابراین لازم است که پژوهش‌های صورت‌گرفته در سال‌های اخیر و نتایج حاصل از تأثیر افزودن نانوذرات بر رسانایی گرمایی و سایر خواص نانوکامپوزیت حاصل بررسی شود. جدول ۱ به‌منظور بررسی نتایج برجستهٔ مقاله‌های مختلف در مورد مقایسهٔ افزایش رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده ارائه شده است.

جدول ۱ مروری اجمالی بر پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

Table 1. A brief overview of the research conducted in the field of nanocomposites of phase change materials

Remarks	PCMs suggested	Reference
Sami and Etesami (2017) (3)	Paraffin T_m: 54-58 °C Enthalpy: 137.8 J/g	Characterization of thermal properties and stability of paraffin/titanium oxide (TiO_2) composites with and without sodium stearoyl lactylate (SSL) as a surfactant was investigated experimentally. The results showed an increase in the thermal conductivity of the composite containing paraffin/TiO_2/SSL by 47.85% at a concentration of 3%, and a slight decrease in the dispersion of nanoparticles in the nanocomposites after 80 heating cycles.
Bahirai et al. (2017) (15)	Paraffin wax T_m: 60 °C Enthalpy: 119.3 J/g	Three types of carbon-based nanostructures including carbon nanofibers (CNF), graphene nanoparticles (GNP), and graphite nanopowder (GrP) were combined with paraffin wax and a small amount of PVP-40 was added to the mixture for good dispersion of nanoparticles in liquid PCM. The obtained results showed an increase in the thermal conductivity of PW/GrP by 620% and 1100% respectively in the concentration of 7.5% and 10%.
Dsilva Winfred Rufuss et al. (2018) (16)	Paraffin T_m: 64 °C	The effect of phase change materials reinforced with nanoparticles on the performance of stationary solar devices was investigated. Three types of nanoparticles TiO_2, CuO, and graphene oxide (GO) were dispersed separately in paraffin with 0.3% by weight and sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) was also used as surfactant. Finally, an increase in the thermal conductivity of paraffin/TiO_2, paraffin/CuO, and paraffin/GO was observed by 25%, 28.8% and 101%, respectively, at a concentration of 0.3%.
Masoumi et al. (2019) (17)	Stearic acid T_m: 62-64 °C Enthalpy: 130 J/g	In this review, nanoparticle-enhanced phase change materials were prepared on a laboratory scale by dispersing TiO_2 nanoparticles in stearic acid with the addition of SDBS surfactant using the sedimentation equilibrium method (SBM) and an increase in the thermal conductivity of stearic acid/TiO_2 by 27% was observed at a concentration of 5%. The results of the structural analysis showed that the nanoparticles were uniformly dispersed in the base matrix with the addition of the surfactant. Also, the chemical stability and thermal reliability of phase change materials improved with nanoparticles were observed after 250 thermal cycles.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

He et al. (2019) (18)	Myristic acid T_m: 54-55 ℃ Enthalpy: 194.90 J/g	In this research, the addition of carbon-based nanoparticles, including graphene nanoplatelets (GNPs), multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), and nanographite (NG) was done to improve the thermal conductivity of myristic acid phase change material for solar thermal energy storage. The obtained results showed an increase in the thermal conductivity of myristic acid/GNPs, myristic acid/MWCNTs, and myristic acid/NG by 176.26%, 47.30% and 44.01%, respectively, at a concentration of 3% for the solid phase. Also, the results of DSC analysis reported the excellent stability of nanoparticle-enhanced phase change materials after 100, 200 and 300 thermal cycles.
Haghighi et al. (2019) (17)	Paraffin T_m: 27.7 ℃ Enthalpy: 206 J/g	The effect of adding different weight percentages of different nanoparticles such as CuO, TiO_2, Al_2O_3, and graphene to paraffin along with the addition of SDS as a surfactant on improving its thermal properties was investigated on a laboratory scale. The results showed that the highest and the lowest coefficient of thermal conductivity are respectively related to paraffin/graphene at a concentration of 3% and paraffin/Al_2O_3 at a concentration of 1% and Nanocomposites containing 2 wt% TiO_2 and 1 wt% graphene have the highest and lowest energy storage capacity, respectively, compared to pure paraffin.
George et al. (2020) (19)	Paraffin wax T_m: 58-60 ℃ Enthalpy: 153.61 J/g	The effect of adding conductive polyaniline (PANI) and copper oxide (CuO) nanoparticles with different weight percentages in the paraffin wax (PW) matrix by adding the surfactant TritonX-100 was investigated experimentally and the increase in thermal conductivity of PW/PANI and PW/CuO was observed by 46.8% and 63.6%, respectively, at the concentration of 1%. In this investigation, the thermal stability of paraffin wax and its composite was determined using an accelerated thermal cycle.
Kabeel et al. (2020) (20)	Paraffin wax T_m: 55 ℃	In this research, a composite of graphene oxide nanoparticles (GNP) in paraffin wax with the presence of SDBS as a surfactant was used to produce fresh water in a fixed tubular solar device. The obtained results reported an increase in the thermal conductivity of PW/GNP by 52% at a concentration of 0.3%.
Arshad et al. (2020) (21)	RT-35HC Commercial paraffin T_m: 34-36 ℃	In an experimental study by dispersing titanium oxide nanoparticles (TiO_2) from 0 to 2% by weight in pure commercial PCM samples RT-35HC and the addition of SDBS as a surfactant to increase the dispersion of nanoparticles in PCM, the physical properties, thermal and chemical stability of the said nanocomposite were investigated. The increase in thermal conductivity of RT-35HC/TiO_2 was observed by 59.5% in 2% concentration.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Laghari et al. (2022) (22)	Paraffin wax Tm: 47-48 °C Enthalpy: 160 J/g	This study was conducted to characterize the titanium dioxide-graphene binary composite (TiO_2-Gr) (1% by weight of titanium oxide and 0.1, 0.5, 1, and 2 wt% graphene) with paraffin wax to improve the thermophysical properties was added with SDBS as surfactant. The results showed an increase in the thermal conductivity of PW/TiO_2 and PW/TiO_2-Gr by 120% and 179%, respectively, at a concentration of 1%. Also, the results of TGA, DSC, and FTIR analysis, which were taken after 0 and 300 cycles, clearly showed the chemical and thermal stability of the nanocomposite.
Sheikh et al. (2023) (23)	A biocompatible phase change material Brand name Pure-Temp 29 Tm: 29 °C Enthalpy: 202 J/g	This experimental research was carried out in order to cool an aluminum heat sink, in which graphite nanoparticles with different surfactants (SSL, SDBS, and sodium dodecyl sulfate (SDS)) were added to the phase change material and then the thermal performance of the phase change material was investigated. After performing the tests, the mass fraction of graphite to surfactants was selected with a ratio of 1 to 3. This resulted in a stable solution except in the case of nanocomposites made with SSL. The results of the measurements showed an increase in the thermal conductivity of graphite-PCM/SDBS and graphite-PCM/SDS by 240% and 218%, respectively, at a concentration of 5% with a ratio of 1:3 graphite to surfactant.

۲-۱ تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

نانوکامپوزیت مواد تغییرفازدهنده مخلوط مایع-جامدی است که باید دارای تعلیق یکنواخت و پایدار، تجمع ناچیز ذرات و بدون تغییر شیمیایی باشد (۱۴). مواد افزودنی نانو عموماً با دو روش: الف) تهیهٔ یک‌مرحله‌ای و ب) تهیهٔ دومرحله‌ای، در زمینهٔ پایهٔ PCM پراکنده می‌شوند (۲۴).

۲-۱-۱ روش یک‌مرحله‌ای

در روش یک‌مرحله‌ای، تولید نانوذرات و پراکنش آن‌ها در PCM پایه در یک مرحله انجام می‌شود (۱۴). در این روش از نقل و انتقال مواد، نگه‌داری، ذخیره و خشک‌کردن به‌طور کامل جلوگیری می‌شود تا پراکنش مناسب نانوافزودنی‌ها در PCM به‌دست آید و کلوخگی به کمترین میزان ممکن برسد. البته این روش همانند سایر روش‌ها معایبی دارد که می‌توان به واکنش ناقصی که منجر به باقی ماندن مقادیری از اجزای واکنش‌دهنده در PCM پایه می‌شود و هزینه‌های نسبتاً بالای مربوط به آن اشاره کرد. در روش تهیهٔ یک‌مرحله‌ای، کامپوزیت‌های تولیدشده به‌دلیل اندازهٔ کم ذرات، پراکندگی بهتر در زمینهٔ پایه و افزودن تثبیت‌کننده، پایداری خیلی خوبی از خود نشان می‌دهند (۲۵).

اویخالفان (Ouikhalfan) و همکاران (۲۶) با استفاده از روش یک‌مرحله‌ای، $Al(NO_3)_3.9H_2O$ و اوره را وزن کرده، در آب مقطر مخلوط کردند و این ترکیب را به مدت ۵-۳ دقیقه در مایکروویو خانگی قرار دادند. سپس این محلول را به موم نفتی اضافه کردند و به مدت ۳۰ دقیقه تحت فراصوت قرار دادند تا کامپوزیت آلفا-نانوآلومینا/موم نفتی مورد نیاز به‌دست آید. در نهایت آلفا نانوآلومینا با نسبت‌های بارگذاری متفاوت به موم نفتی اضافه شد و با افزایش بارگذاری این ذره در کامپوزیت‌ها، افزایش رسانایی گرمایی و گرمای نهان برای کامپوزیت‌ها مشاهده شد.

محققان دیگری همچون ژانگ و فنگ (Zhang & Feng) (۲۷)، خو، ژانگ (Xu, Zhang) و همکاران (۲۸)، ژانگ (Zhang) و همکاران (۲۹) و خو، وانگ (Xu, Wang) و همکاران (۳۰) نیز در پژوهش خود از این روش برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده استفاده کردند.

۲-۱-۲ روش دومرحله‌ای

در روش دومرحله‌ای، ابتدا نانوذرات خریداری یا سنتز شده و سپس در PCM پایه پراکنده می‌شوند (۱۴). پرکاربردترین روش برای تهیهٔ PCM بهبود یافته با نانوذرات، روش دومرحله‌ای است که در آن ابتدا نانوذرات، نانولوله‌ها، نانوالیاف یا نانومیله‌ها با استفاده از روش‌های سل-ژل، میکروامولسیون‌سازی و یا سنتز گرمابی (Hydrothermal) تهیه می‌شوند. سپس، نانوپودر آماده‌شده با کمک آسیاب گلوله‌ای، اختلاط بالا، هم‌زدن فراصوت یا هم‌زدن قوی مغناطیسی شدید در PCM پایه پراکنده می‌شود (۲۴). کلوخگی نانوذرات مهم‌ترین چالش این روش است که تا حدودی می‌توان با فراصوت و هم‌زدن گسترده از آن جلوگیری کرد. از سوی دیگر نیاز به اصلاح سطح و افزودن

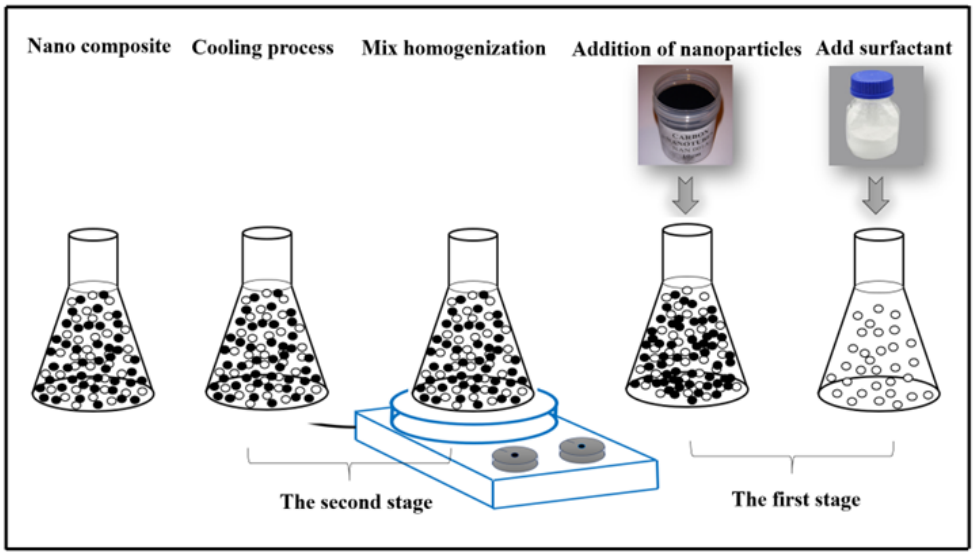
[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

سطح‌فعال در برخی از موارد که پایداری نانوذرات درون PCM به خوبی صورت نمی‌گیرد، یکی دیگر از معایب این روش محسوب می‌شود. امروزه تعداد کمی از محققین حتی بدون استفاده از سطح‌فعال‌ها از روش دومرحله‌ای با موفقیت استفاده کرده‌اند. از دیگر مزایای این روش می‌توان به فرایند ساده و مقرون‌به‌صرفه آن و تقریباً مناسب‌بودن آن برای تمامی نانوذرات اشاره کرد (۲۵).

سیواسامی (Sivasamy) و همکاران (۳۱) نانوذرات نقره را با روش کاهش تثبیت‌شدهٔ مناسب سنتز کردند. سپس نانوذرات نقره را به‌صورت جداگانه به‌ترتیب در ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی به ۱۵۰ گرم مادهٔ تغییرفازدهنده اسیدمیریستیک (MA) اضافه کرده و کامپوزیت مدنظر را با به‌کارگیری روش دومرحله‌ای تهیه کردند. ایشان خواص شیمیایی دسته‌بندی کرد (۱۴). از مهم‌ترین خواص ترموفیزیکی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده می‌توان به رسانایی گرمایی، گرمای نهان، دمای تغییر فاز و پایداری گرمایی اشاره کرد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده وجود دارد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان از روش گرماسنجی پویشی تفاضلی (Differential Scanning Calorimetry (DSC)) برای اندازه‌گیری گرمای نهان و دمای تغییر فاز، روش سیم داغ گذرا یا KD۲ برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی و چرخه‌های سرمایش-گرمایش متوالی برای بررسی پایداری گرمایی یاد کرد.

تجزیه‌وتحلیل ساختار شیمیایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، سازگاری شیمیایی نانوذرات و مادهٔ



شکل ۱ روش دومرحله ای برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

Figure 1. Two-step method for the preparation of nanocomposites of phase change materials

به هنگام تهیهٔ کامپوزیت برای جلوگیری از کلوخگی نانوذرات، پراکنش خوب و پایداری شیمیایی عالی از SDBS به‌عنوان سطح‌فعال استفاده کردند و برای کاهش تجمع و بهبود پراکنش، فرایند فراصوت را به مدت ۵۰ دقیقه انجام دادند.

محققان دیگری از جمله معصومی و همکاران (۱۷)، جورج (George) و همکاران (۱۹)، تنگ (Teng) و همکاران (۳۲)، شارما (Sharma) و همکاران (۳۳) و نورانی و همکاران (۳۴) از این روش برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده استفاده کردند. نمایی از روش دومرحله‌ای برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در شکل ۱ آمده است.

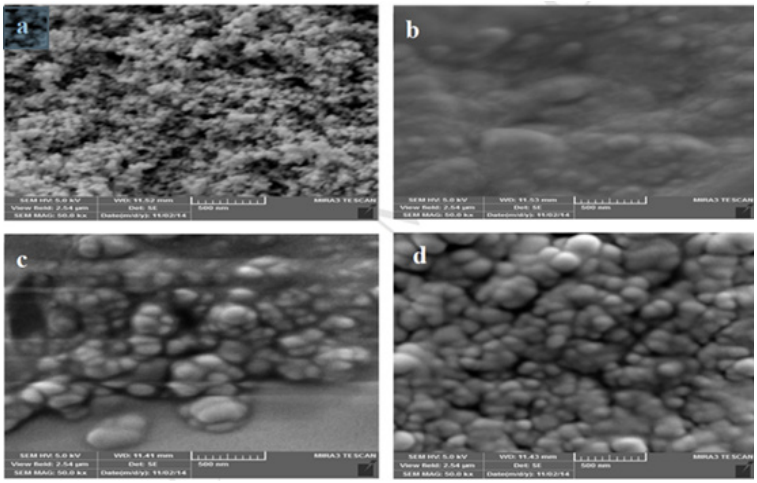
۳ ویژگی‌های نانوکامپوزیت مادهٔ تغییرفازدهنده

در نگاهی کلی، ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده را می‌توان در سه گروه شامل: خواص ترموفیزیکی، خواص ریختاری (Morphological) و تغییرفازدهنده و عدم واکنش شیمیایی اجزا با یکدیگر با آزمون طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) ارزیابی می‌شود.

خواص ریختاری مانند اندازه، شکل، ساختار، مساحت سطح، توزیع نانوذرات در زمینهٔ PCM و ریختار نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده که بر خواص فیزیکی تأثیرگذار است، با روش‌هایی همچون میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM)، میکروسکوپی الکترونی پویشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) مورد آزمون قرار می‌گیرد. همچنین به‌منظور بررسی ویژگی‌های نانوذرات، از پراکندگی نور پویا (DLS) برای تعیین اندازه و توزیع اندازه نانوذرات، برونوئر- امت- تلر (BET) و تحلیل‌گر جذب نیتروژن برای اندازه‌گیری سطح ویژهٔ نانوذرات و پراش پرتوی ایکس (XRD) برای اندازه‌گیری تبلور نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌شود (۱۴).

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

باباپور و کریمی (۳۵) در مطالعه‌ای از نانوذرات مختلف مانند SiO_2، Al_2O_3، Fe_2O_3، ZnO و ترکیبات آن‌ها به‌منظور بهبود رسانایی گرمایی برای تولید نمونه‌های پارافین اصلاح‌شده به روش سنتز مستقیم استفاده کردند. خواص گرمایی مانند دمای تغییر فاز، گرمای نهان ذوب و انجماد و ظرفیت گرمایی کامپوزیت‌ها با روش گرماسنجی پویشی تفاضلی اندازه‌گیری شد و ریختار، ساختار، توزیع و اندازه ذرات نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی مشخص شد که تصاویر آن در شکل ۲ قابل‌مشاهده است. این شکل، نانوذرات SiO_2 را نشان می‌دهد که در نسبت‌های مختلف در PCM پراکنده شده‌اند. شفاف‌ترین ریختار با ذرات کوچک‌تر و توزیع خوب برای نمونهٔ حاوی ۸ درصد وزنی SiO_2 با اندازه ذرات ۱۱ نانومتر به‌دست آمد که نشان‌دهندهٔ ورود ساختار شبکهٔ SiO_2 به پارافین است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رسانایی و نفوذ گرمایی کامپوزیت‌ها به‌طور قابل‌توجهی با افزایش کسر جرمی نانوذرات در دمای آزمایش‌شده افزایش یافته و بهترین نتیجه برای نمونه‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3 به‌دست می‌آید. کمترین کاهش گرمای نهان نیز برای PCM با نانوذرات Al_2O_3 مشاهده شده است.



شکل ۲ ریختار نانوذرات SiO_2 در نسبت‌های جرمی مختلف در PCM (۳۵)
Figure 2. Morphology of SiO_2 nanoparticles in different mass ratios (35)

۳-۱ تأثیر افزودن نانوذرات بر خواص گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

بدیهی است افزودن نانوذرات به PCMها بر خواص نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهندهٔ تشکیل‌شده نسبت به مادهٔ اولیه تغییراتی می‌گذارد. رسانایی گرمایی، گرمای نهان و دمای تغییر فاز تحت تأثیر افزودن نانوذرات دستخوش تغییر می‌شوند. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، آشکارترین تأثیری که افزودن نانوذرات در درصد بهینه بر نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده می‌گذارد، افزایش رسانایی گرمایی آن‌هاست.

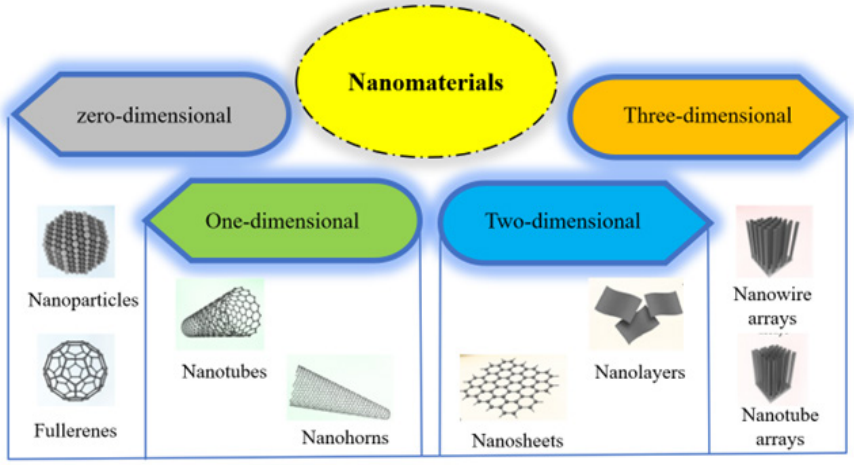
رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده با افزایش درصد نانوذرات در PCM به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (۳۶)، اما ممکن است اصلاح سطح نانوذره لازم باشد (۳۷). در میان نانوذرات پراکنده‌شده در PCMهای مختلف، نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوالیاف کربنی (CNF)به‌دلیل خواص فیزیکی منحصربه‌فرد خود رسانایی گرمایی بهتری را نشان دادند (۳۸–۴۰). تغییر اندازه، غلظت و اصلاح خواص سطحی CNT/CNF پراکنده در PCM می‌تواند رفتار انتقال گرمای کامپوزیت را به‌طور چشمگیری تغییر دهد (۴۱). همچنین نانوذرات گرافیت و گرافن دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که آن‌ها را به تقویت‌کنندهٔ رسانایی گرمایی خوبی برای PCMها تبدیل می‌کند (۴۲–۴۶). نانوذرات اکسید فلزی و نانوذرات فلزی پراکنده در PCM نیز افزایش رسانایی گرمایی را نشان می‌دهند که با تغییر شکل، اندازه و نسبت آن‌ها میزان رسانایی گرمایی تغییر خواهد کرد. این افزایش در رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش قابل‌توجه زمان ذوب و انجماد در نانوکامپوزیت می‌شود. کاهش زمان ذوب و انجماد نانوکامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده برای نانوذرات مختلف، متفاوت است. همچنین سرعت ذوب و انجماد نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده به درصد جرمی/حجمی نانوذرهٔ پراکنده بستگی دارد. انتخاب درصد جرمی/حجمی نانوذرات باید به دقت انجام شود، زیرا مقادیر زیاد و نامناسب از نانوذرات، می‌تواند تأثیر منفی بر خواص PCM بگذارد (۳۶).

باوجود اثر مثبت نانوذرات بر رسانایی گرمایی مادهٔ تغییرفازدهنده، بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد، در اکثر موارد با افزایش درصد نانوذرات، ظرفیت گرمای نهان PCM کاهش می‌یابد. همچنین باید توجه داشت که درصد بالای نانوذرات ممکن

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

است بر دیگر خواص مواد تغییرفازدهندهٔ بهبودیافته اثر نامطلوبی نیز داشته باشد. از آنجایی که نانوذرات به‌دلیل مساحت سطح بالا، انرژی سطحی بالا و وجود نیروهای واندروالس قوی بین آن‌ها تمایل زیادی به کلوخگی و رسوب‌گذاری دارند، پایداری کمی را طی فرایند از خود نشان می‌دهند (۴۷). بنابراین باید مقدار بهینه‌ای از نانوذرات انتخاب شود که در آن افزایش رسانایی گرمایی و پایداری پراکنهٔ نانوذرات درون زمینهٔ پایه حداکثر و کاهش ظرفیت گرمای نهان کمینه باشد. همچنین شکل و اندازهٔ نانوذره می‌تواند اثرات مثبتی در هسته‌زایی به‌عنوان مراکز رشد بلور PCM و دمای انجماد داشته باشد. اثر هسته‌زایی نانوذره می‌تواند زمان خنک‌سازی PCM را طی فرایند انجماد کاهش دهد. از سوی دیگر، با بارگذاری بیشتر نانوذرات در PCM، گرانروی دینامیکی بسیار بالاتر از رسانایی گرمایی نانوذرات اکسید فلزی پایدار هستند و از رسانایی گرمایی مناسبی برخوردارند. بنابراین می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای دستیابی به ویژگی‌های گرمایی بهتر باشند (۴۸). در میان اکسیدهای فلزی، دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید مس به‌دلیل رسانایی گرمایی بالاتر، بیشتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند.

مطهر (Motahar) و همکاران (۴۹) با پراکنش نانوذرات TiO_2 در ان-اوکتادکان کامپوزیتی با خواص و رفتار بهبودیافته ساختند. در ابتدا ان-اوکتادکان به‌عنوان محیط پراکنش انتخاب و به‌دلیل حضور گازهای محلول در آن، در شرایط خلأ ذوب و گاززدایی شد. در ادامه، نانوذرات TiO_2 با استفاده از همزن مکانیکی و حمام فراصوت در ان-اوکتادکان پراکنده شدند. برای این منظور، دمای حمام بر ۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد تا از ذوب PCM اطمینان حاصل شود. سپس



شکل ۳ دسته‌بندی نانومواد بر اساس بُعد
Figure 3. Classification of nanomaterials based on dimension

مواد نانوساختار به PCM مایع اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد تا یک کامپوزیت PCM پایدار به‌دست آید. در این بررسی رسانایی گرمایی و خواص رئولوژیکی ان-اوکتادکان با نانوذرات TiO_2 پراکنده در آن به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد رسانایی گرمایی کامپوزیت ساخته‌شده بستگی به میزان بارگذاری نانوذرات و دمای فرایند دارد و به‌طور کلی، با افزودن نانوذرات رسانایی گرمایی در مقایسه با مقدار متناظر برای PCM خالص افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر افزایش رسانایی گرمایی در فاز جامد و مایع به‌ترتیب در ۳ و ۴ درصد وزنی رخ داد.

محققان دیگری همچون سورش کومار و کالایسلوام(Suresh Kumar & Kalaiselvam) (۵۰)، هاریکریشنان (Harikrishnan) و همکاران (۵۱)، هان (Han) و همکاران (۵۲)، چایچان (Chaichan) و همکاران (۵۳) و ساهان و پاکسوی (Sahan & Paksoy) (۵۴) از نانوذرات اکسید فلزی برای بهبود ویژگی‌های گرمایی افزایش می‌یابد که می‌تواند اثرات مثبت PCM را کاهش دهد (۳۶).

۴ انواع نانوافزودنی‌ها

در حالت کلی نانومواد را می‌توان بر اساس مبدأ پیدایش، ابعاد و پیکربندی ساختاری دسته‌بندی کرد. به این ترتیب نانومواد بر اساس مبدأ پیدایش به دو دسته نانو مواد طبیعی و مصنوعی، بر اساس ابعاد به نانومواد صفر، یک، دو و سه‌بعدی و بر اساس پیکربندی ساختاری به نانومواد فلزی و کربنی تقسیم‌بندی می‌شوند (۱). نمایی از دسته‌بندی نانومواد بر اساس ابعاد در شکل ۳ آورده شده است. از بین طبقه‌بندی ذکرشده نانوافزودنی‌هایی همچون نانوذرات اکسید فلزی، نانوذرات فلزی و نانوذرات کربنی به‌طور گسترده استفاده شده است که در ادامه مطالبی در این زمینه ارائه شده است.

۴-۱ نانوذرات اکسید فلزی

نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهندهٔ تهیه‌شده با

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

استفاده کردند.

۴-۲ نانوذرات فلزی

انواع مختلفی از فلزات از جمله نقره، مس، آهن، تیتانیوم و آلومینیوم می‌توانند به‌عنوان نانوذره استفاده شوند. نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهندهٔ فلزی عملکرد گرمایی بهتری نسبت به نانوذرات اکسید فلزی دارند اما پایداری کمتری دارند که این پایداری کم ناشی از برخی شرایط فیزیکی و یا شیمیایی مانند تجمع، رسوب و اکسیداسیون است. چنین ناپایداری را می‌توان با روش‌هایی مانند ارتعاش (۵۵) و افزودن سطح‌فعال (۵۶) بهبود بخشید. خاطرنشان می‌سازد که بیشتر تحقیقات مربوط به نانوکامپوزیت مبتنی بر فلز صرفاً بر نانوذرات مس و نقره متمرکز شده است؛ درحالی‌که سایر فلزات عمدتاً در زمینهٔ اکسیدهای فلزی در نظر گرفته می‌شوند (۴۸).

وو (Wu) و همکاران (۵۶) اثرات نانوذرات مس را بر فرایند تغییر فاز نانوکامپوزیت‌های پارافین- مس بررسی کردند. آن‌ها مواد تغییرفازدهندهٔ کامپوزیت پارافین- مس را به روش دومرحله‌ای تهیه کرده و از Hitenol BC-10 به‌عنوان سطح‌فعال برای بهبود پراکنش نانوذرات مس استفاده کردند. در این بررسی، اثرات نانوذرات مس بر رسانایی گرمایی و انتقال گرمای PCMها به‌ترتیب با استفاده از تحلیل‌گر ثابت گرمایی قرص (Disk) داغ و روش‌های رصد فروسرخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهندهٔ حداکثر افزایش رسانایی گرمایی تا ۱۴/۲ درصد در حالت جامد و ۱۸/۱ درصد در حالت مایع در ۲ درصد وزنی پارافین- مس بود. همچنین عکس‌های رصد فروسرخ نشان داد که نرخ ذوب و انجماد مس/پارافین افزایش یافته است و برای ۱ درصد وزنی پارافین- مس، زمان ذوب و انجماد را می‌توان به‌ترتیب حدود ۳۳/۳ و ۳۱/۶ درصد کاهش داد. علاوه‌بر مورد یادشده، استفاده از نانوذرات فلزی توسط پژوهشگرانی همچون سیواسامی (Sivasamy) و همکاران (۳۱)، کوئی (Cui) و همکاران (۵۵) و الغصین (Al Ghossein) و همکاران (۵۷) نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۳ نانوذرات کربنی

نانومواد کربنی بیشتر از کربن تشکیل شده و شکل‌های مختلفی به خود می‌گیرند که رایج‌ترین این شکل‌ها، صفحه (گرافن و گرافیت)، استوانه (نانولوله‌ها) و کره (فلورن) است (۱). نانوذرات مبتنی بر کربن به‌دلیل رسانایی گرمایی بالا، چگالی کم، سطح ویژهٔ بالا و پایداری شیمیایی به‌طور گسترده در ترکیب با PCM ها استفاده می‌شود (۱۴). ساختار نانولوله‌های کربنی (CNT) استوانه‌ای با لایه‌های مختلف است. CNTها می‌توانند نانولوله‌های کربنی تک‌جداره (SWCNT) یا نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) باشند (۴۸). اگرچه CNTها رسانایی گرمایی عالی دارند، اما بهبود رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های PCM حاوی CNT در مقایسه با کامپوزیت‌های PCM حاوی گرافن کمتر است (۱۴).

سیار (Sayyar) و همکاران (۳۸) طی مطالعه‌ای، از ترکیب یوتکتیک، اسیدکاپریک (CA) و اسیدپالمیتیک (PA) با نانوصفحات به‌هم‌پیوسته گرافیت منبسط‌شده به‌منظور تشکیل نانوکامپوزیت مواد تغییر فازدهنده پایدار استفاده کردند. آن‌ها نانوکامپوزیت مواد تغییر فازدهنده را با استفاده از ساختار ساندویچی به تخته دیوار گچی ادغام کرده و عملکرد گرمایی آن را با استفاده از سلول‌های آزمایشی تحت تغییر دمای شب و روز شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با پانل‌های دیوار تجاری ارزیابی کردند. برای انجام این پژوهش در ابتدا CA و PA در دمای ذوب خود، ذوب شدند. سپس مخلوط یوتکتیک CA-PA با افزودن آهسته CA به PA درحالی‌که به سرعت هم زده می‌شد، با نسبت مشخص به‌دست آمد. در ادامه، برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، نانوصفحات متصل به گرافیت با ترکیب نهایی ۸ درصد وزنی گرافیت و ۹۲ درصد PCM به مخلوط CA-PA اضافه شد و به مدت ۱ ساعت در حمام فراصوت قرار گرفت و سپس تا دمای اتاق خنک شد. در نهایت نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از نانوکامپوزیت مواد تغییر فازدهنده در تخته‌های دیواری باعث کاهش ۷۹ درصدی مصرف انرژی برای حفظ دمای داخلی در منطقهٔ آسایش می‌شود.

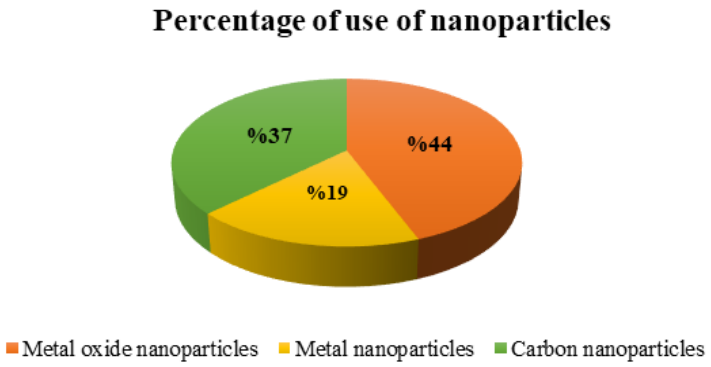
به‌کارگیری نانوذرات کربنی و بررسی اثرات ناشی از این افزودنی‌ها بر روی نانوکامپوزیت‌ها نیز توسط محققانی همچون زابالگی (Zabalegui) و همکاران (۳۹)، وانگ (Wang) و همکاران (۴۰)، لیو و رائو (Liu & Rao) (۵۸)، زنگ (Zeng) و همکاران (۵۹)، چوی (Choi) و همکاران (۶۰) و سیلاخوری (Silakhori) و همکاران (۶۱) انجام شد. نمایی از درصد مورد استفاده از نانوذرات مختلف در پژوهش‌های بررسی‌شده در مطالعهٔ اخیر در شکل ۴ آورده شده است.

۵ اثر افزودن مواد نانوساختار بر رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

افزودن مواد نانوساختار به مواد تغییرفازدهنده، راهکاری نوین برای بهبود عملکرد انتقال گرمایی این مواد در ذخیره‌سازی و رهاسازی انرژی گرمایی است. جدول ۲ و نیز نمودار شکل ۵، تأثیر افزودن مواد نانوساختار بر رسانایی گرمایی مواد تغییرفازدهنده در پژوهش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از جدول نشان می‌دهد که افزودن مواد نانوساختار به مواد تغییرفازدهنده به‌طور کلی منجر به افزایش قابل‌توجه رسانایی گرمایی این مواد شده و این افزایش در نمونه‌های حاوی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



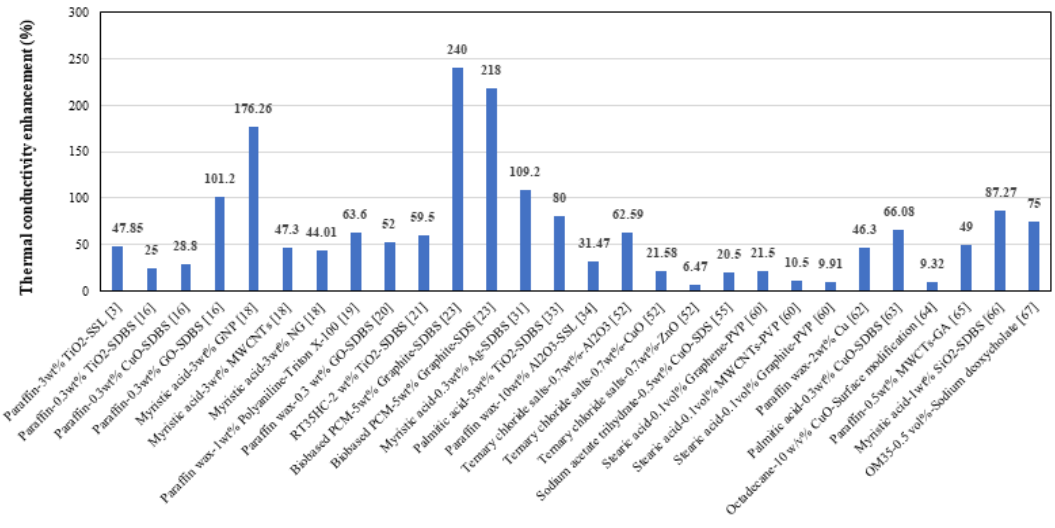
شکل ۴ درصد نانوذرات مورد استفاده در زمینهٔ PCM در پژوهش‌های اخیر
Figure 4. The percentage of nanoparticles used in recent researches

جدول ۲ بررسی کمّی افزایش رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در پژوهش‌های اخیر
Table 2. Quantitative investigation of the increase in thermal conductivity of phase change material nanocomposites in recent research

Reference	PCM (Thermal conductivity)	Nanoparticles (%)	Surfactant	Thermal conductivity enhancement (%)
Sami & Etesami (2017) (3)	Paraffin (0.139 W/m.K)	TiO_2 (3.0 wt%)	SSL	47.85
Dsilva Winfred Rufuss et al. (2018) (16)	Paraffin (0.26 W/m.K)	TiO_2 (0.3 wt%) CuO (0.3 wt%) GO (0.3 wt%)	SDBS	25 28.8 101.2
He et al. (2019) (18)	Myristic acid (0.22 W/m.K)	GNP (3.0 wt%) MWCNTs (3.0 wt%) NG (3.0 wt%)	-	176.26 47.30 44.01
George et al. (2020) (19)	Paraffin wax (0.2 W/m.K)	Polyaniline (PANI) (1.0 wt%) CuO (1.0 wt%)	Triton X-100	46.8 63.6
Kabeel et al. (2020) (20)	Paraffin wax (0.26 W/m.K)	Graphene oxide (0.3 wt%)	SDBS	52
Arshad et al. (2020) (21)	RT–35HC (0.2 W/m.K)	TiO_2 (2.0 wt%)	SDBS	59.5
Sheikh et al. (2023) (23)	Biobased Phase Change Material (0.25 W/m.°C)	Graphite (5 wt%) Graphite (5 wt%)	SDBS SDS	240 218
Sivasamy et al. (2019) (31)	Myristic acid (MA) (0.17 W/m.K)	Ag (0.3 wt%)	SDBS	109.2
Sharm et al. (2016) (33)	Palmitic acid (0.19 W/m.K)	TiO_2 (5 wt%)	SDBS	80
Nourani et al. (2016) (34)	Paraffin wax (0.197 W/m.K)	$Al2O_3$ (10 wt%)	SSL	31.47

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Han et al. (2020) (52)	Ternary chloride salts (MgCl2:KCl:NaCl with 51:22:27 molar ratio)	Al_2O_3 (0.7 wt%) CuO (0.7 wt%) ZnO (0.7 wt%)	-	62.59 21.58 6.47
Cui et al. (2016) (55)	Sodium acetate trihydrate (0.777 W/m.K)	Nano copper (0.5 wt%)	SDS	20.5
Choi et al. (2014) (60)	Stearic acid (0.33 W/m.K)	Graphene (0.1 vol%) MWCNTs (0.1 vol%) Graphite (0.1 vol%)	PVP	21.5 10.5 9.91
Lin & Al-Kay-iem (2016) (62)	Paraffin wax (0.172 W/m.K)	Cu (0.5 wt%) Cu (1.0 wt%) Cu (1.5 wt%) Cu (2.0 wt%)	-	14 23.9 42.5 46.3
Ezhumalai et al. (2018) (63)	Palmitic acid (0.17 W/m.K)	CuO (0.1 wt%) CuO (0.2 wt%) CuO (0.3 wt%)	SDBS	19.87 45.61 66.08
Águila et al. (2018) (64)	Octadecane (0.131 W/m.K)	CuO (10.0 w/v%)	Surface mod-ification with sodium oleate	9.32
Kazemi et al. (2019) (65)	Paraffin (0.2 W/m.K)	MWCNTs (0.2 wt%) MWCNTs (0.5 wt%)	Gum arabic (GA)	35 49
Harikrishnan et al. (2019) (66)	Myristic acid (0.19 W/m.K)	SiO2 (0.2 wt%) SiO2 (0.5 wt%) SiO2 (0.8 wt%) SiO2 (1.0 wt%)	SDBS	25.43 43.06 60.48 87.27
Sivashankar et al. (2020) (67)	OM35 (0.2 W/m.K)	GNP (0.5 vol%)	Sodium deoxy-cholate	75



شکل ۵ مقایسهٔ درصد افزایش رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در اثر افزودن مواد نانوساختار

Figure 5. Comparison of the percentage increase in thermal conductivity of phase change material nanocomposites due to the addition of nanostructured materials

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

نانوافزودنی‌های کربنی بسیار چشمگیر است. علت افزایش رسانایی گرمایی برای نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوافزودنی‌های کربنی بالا بودن رسانایی گرمایی این نوع از نانوافزودنی‌ها نسبت به سایر مواد نانوساختار است. همان‌طور که مشخص است، بیشترین رسانایی گرمایی در پژوهش‌های مورد مطالعه به‌ترتیب برای نمونه‌های حاوی مادهٔ تغییرفازدهندهٔ زیستی به همراه ۵ درصد وزنی گرافیت با حضور SDBS و SDS به‌عنوان سطح‌فعال و نمونهٔ حاوی اسیدمیریستیک به همراه ۳ درصد وزنی نانوصفحات‌های گرافن است. به‌طور کلی افزودن سطح‌فعال‌ها به نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده می‌توانند با کاهش تنش سطحی بین مادهٔ تغییرفازدهنده و نانوافزودنی، پراکنش مادهٔ نانوساختار را در زمینهٔ مادهٔ تغییرفازدهنده بهبود بخشد. بنابراین نوع و غلظت سطح‌فعال می‌تواند بر ریختار و ساختار شبکه‌ای مادهٔ تغییرفازدهنده تأثیر بگذارد. همان‌طور که مشخص است در دو نمونهٔ حاوی مادهٔ تغییرفازدهندهٔ زیستی به همراه ۵ درصد وزنی گرافیت با حضور SDBS و SDS، با وجود شرایط یکسان برای دو نمونه، تغییر در نوع سطح‌فعال منجر به افزایش بیشتر رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت شده است که این موضوع به‌دلیل تأثیرگذاری بهتر سطح‌فعال SDBS بر کاهش تنش سطحی و پراکنش بهتر مواد نانوساختار در زمینهٔ مادهٔ تغییرفازدهنده است.

همچنین نتایج گویای آن است که نوع مادهٔ نانوساختار و مادهٔ تغییرفازدهنده نیز تأثیر مستقیمی بر میزان افزایش رسانایی گرمایی دارد و برخی نانوافزودنی‌ها و مواد پایه ترکیب بهتری را ایجاد کرده و منجر به افزایش رسانایی گرمایی بیشتری می‌شوند. با توجه به جدول ۲ پیش‌بینی می‌شود، با افزایش درصد وزنی نانوافزودنی در نانوکامپوزیت، رسانایی گرمایی نیز افزایش یابد. اما موضوع مهمی که در به‌کارگیری نانوذرات در زمینهٔ PCM باید در نظر گرفته شود، پایداری و پراکنش یکنواخت نانوذرات است؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد نانوذرات، احتمال کلوخگی نانوذرات و کاهش ضریب رسانایی گرمایی وجود دارد. همچنین این امر باعث ناپایداری نانوکامپوزیت و رسوب آن‌ها طی فرایندهای متوالی ذوب و انجماد نمونه خواهد شد که در بیشتر مطالعات مورد بررسی قرار نگرفته است.

۶ حضور نانوافزودنی‌ها در PCM و پدیدهٔ اَبَرسرمایش

اَبَرسرمایش (Supercooling) پدیده‌ای در مواد تغییرفازدهنده است که در آن یک فاز مایع، بدون تغییر فاز به جامد، به دمایی پایین‌تر از نقطهٔ انجماد تعادلی خود می‌رسد. به عبارت دیگر، تفاوت بین دمایی که در آن انجماد به‌طور خودبه‌خودی آغاز می‌شود و دمایی که نمودار فاز تعادل برای شروع انجماد پیش‌بینی می‌کند، به‌عنوان اَبَرسرمایش شناخته می‌شود. در شرایط اَبَرسرمایش، گرمای نهان هم‌جوشی که معمولاً هنگام انجماد آزاد می‌شود، ذخیره می‌شود. این حالت

جدول ۳ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ تأثیر افزودن مواد نانوساختار بر پدیدهٔ اَبَرسرمایش

Table 3. Review of research conducted on the effect of adding nanostructured materials on the supercooling phenomenon

Author	PCM	Nanoparticle	surfactant	Supercooling effect investigation
Zou et al. (2018) (68)	Industrial grade paraffin	Graphene, MWCNT & Graphene +MWCNT (0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 and 1.5 wt%)	-	Their results indicated that carbon nanoadditives can slightly reduce the degree of supercooling. The mechanism of this phenomenon can be attributed to the nucleation role of these nanoadditives, which facilitates the formation of paraffin crystals at the interface of nanostructured materials and paraffin.
Cui et al. (2016) (55)	Sodium acetate trihydrate	Nano copper (0.5 wt%)	SDS	In this study, by adding 0.5 wt% copper nanoparticles as the optimal amount, the supercooling point of the nanocomposite was reduced to about 0.5 °C. Copper nanoparticles are significantly more effective in reducing the supercooling point of pure PCM than mineral salt hydrates as nucleating agents.
Lin & Al-Kayiem (2016) (62)	Paraffin wax	copper nanoparticles (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 wt%)	-	The results show that the addition of copper nanoparticles to paraffin led to a decrease in supercooling. This phenomenon can be attributed to the effective nucleation role of copper nanoparticles in facilitating the crystallization process of paraffin. The presence of copper nanoparticles acts as crystal growth centers and increases the rate of paraffin crystal formation, thereby reducing the supercooling phenomenon.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

He et al. (2019) (18)	Myristic acid	GNP, MWCNTs & NG (3.0 wt%)	-	In this study, the addition of graphene nanoplatelets to the myristic acid phase change material, due to the nucleation effect of the nanoadditives, led to the effective elimination of the supercooling phenomenon in these nanocomposites.
Arshad et al. (2020) (21)	RT-35HC	TiO_2 (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 wt.%)	SDBS	They reported a slight decrease in the crystallization temperature of the nanocomposite due to the confinement of the crystallization of the surface layers of TiO_2 nanoparticles in the nanocomposite, and a slight change in the maximum melting temperature due to the formation of incomplete RT-35HC due to the surface layers. Therefore, these factors caused a very slight increase (less than 1%) in the supercooling temperature in this study.
Sharm et al. (2016) (33)	Palmitic acid	TiO_2 (0.5, 1.0, 3.0, and 5.0 wt%)	SDBS	In this study, the presence of TiO_2 nanoparticles dispersed in palmitic acid acts as crystallization nuclei and leads to an increase in the nucleation rate and a decrease in supercooling in the nanocomposite. As a result, the melting and freezing temperatures of the nanocomposite become close to each other and we achieve simultaneous melting and freezing points.

معمولاً مطلوب نبوده و می‌تواند منجر به مشکلات مختلفی در صنایع و فرایندهای مختلف شود. به همین دلیل، اغلب تلاش می‌شود تا از وقوع اَبَرسرمایش جلوگیری شده یا اثرات آن کمینه شود [۶۸]. در تعداد محدودی از مقالات این پدیده مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاصل از بررسی تأثیر افزودن مواد نانوساختار بر پدیدهٔ اَبَرسرمایش در جدول ۳ خلاصه شده است.

با توجه به اهمیت کاهش پدیدهٔ اَبَرسرمایش در مواد تغییرفازدهنده در کاربردهای مختلف از جمله سامانه‌های ذخیرهٔ انرژی گرمایی، سامانه‌های خنک‌کننده و مواد زیستی، با کنترل دقیق دمای ذوب و انجماد این مواد، می‌توان از آن‌ها در سامانه‌هایی با بازده بالا استفاده کرد. از عوامل مؤثر بر میزان کاهش اَبَرسرمایش می‌توان به نوع، اندازه، غلظت و توزیع نانوافزودنی‌ها اشاره کرد. نتایج پژوهش‌های بررسی‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که افزودن مواد نانوساختار به مواد تغییرفازدهنده می‌تواند به‌طور مؤثری پدیدهٔ اَبَرسرمایش را کاهش دهد. این پدیده به‌دلیل نقش هسته‌زایی مواد نانوساختار در بهبود تشکیل بلورها رخ می‌دهد. مواد نانوساختار به‌عنوان مراکز رشد بلور عمل کرده و باعث می‌شوند فرایند تبلور در دمای بالاتری آغاز شود.

به‌طورکلی سازوکارهای موجود برای کاهش اَبَرسرمایش در اثر افزودن مواد نانوساختار شامل هسته‌زایی، افزایش سطح تماس و تغییر انرژی سطحی است. همچنین نوع مادهٔ نانوساختار استفاده‌شده نیز بر روی این پدیده تأثیرگذار است. برای مثال نانوافزودنی‌های کربنی به‌دلیل سطح ویژهٔ بالا می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تبلور مؤثری عمل کنند. پس از آن نانوذرات اکسید فلزی و نیز فلزی می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تبلور عمل کنند، اما کارایی آن‌ها به‌عوامل مختلفی مانند اندازهٔ ذرات و روش تهیه بستگی دارد.

۷ بررسی پایداری نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده

رسانایی گرمایی را می‌توان با استفاده از سطوح گسترده یا پره‌ها، به‌کارگیری مواد متخلخل و مواد لیفی بهبود بخشید (۱۲). هر چند استفاده از این روش‌ها به‌دلیل افزایش وزن و حجم دستگاه‌های ذخیرهٔ انرژی مطلوب نیستند. در مقابل، پراکنش نانوذرات با رسانایی گرمایی بالا در مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان روشی مناسب برای افزایش رسانایی گرمایی مؤثر معرفی شده است (۳). اما در این حالت با وجود افزایش رسانایی گرمایی PCM توسط نانوذرات، پایدارسازی نانوذرات افزوده‌شده به PCM خالص مسئله‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. استفاده از سطح‌فعال‌ها و اصلاح سطح نانوذرات دو روش برجسته‌ای هستند که می‌توانند برای تثبیت نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده قرار گیرند که در ادامه، مطالعات انجام‌شده در این زمینه شرح داده شده است (۱۴).

۷-۱ اثر سطح‌فعال بر پایداری نانوکامپوزیت‌ها

نانوذرات موجود در نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده به‌دلیل وجود نیروی واندروالس لاندن تمایل به تجمع و کلوخگی دارند. بنابراین برای غلبه بر چنین نیرویی به‌منظور پراکنش یکنواخت نانوذرات درون زمینهٔ PCM، دافعه الکترواستاتیک یا مانع فضایی مورد نیاز است. به‌طورکلی در نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده برای ایجاد مانع فضایی بین نانوذرات و

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

پایدارسازی نانوذرات درون زمینهٔ پایه از پایدارکننده‌های خاصی استفاده می‌شود. در صورت عدم استفاده از این پایدارکننده‌ها، نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهندهٔ تهیه‌شده با گذشت زمان، دچار تغییر پایداری می‌شوند. مدت زمان پایداری این نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده به ویژگی‌های سطح، اندازه و ریختار نانوذرات بستگی دارد (۶۹).

از آنجایی که تجمع نانوذرات منجر به کاهش رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده می‌شود، بررسی پایداری این مواد بسیار اهمیت دارد. یکی از روش‌های مناسب برای افزایش پایداری نانوذرات در نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، استفاده از سطح‌فعال‌ها یا پراکنده‌کننده‌هاست. افزودن سطح‌فعال در سامانه‌های دوفازی روشی آسان و اقتصادی برای افزایش پایداریِ آن‌هاست. این مواد از یک قسمت آب‌گریز، معمولاً یک هیدروکربن با زنجیرهٔ بلند، و یک قسمت قطبی آب‌دوست تشکیل شده‌اند. در سامانه دوفازی، پراکنده‌کننده تمایل دارد در فصل‌مشترک دو فاز قرار گیرد. با توجه به ترکیب سر، سطح‌فعال‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: سطح‌فعال‌های غیریونی بدون گروه باردار در سر آن، سطح‌فعال‌های آنیونی با گروه‌های سر دارای بار منفی، سطح‌فعال‌های کاتیونی با گروه‌های سر با بار مثبت و سطح‌فعال‌های آمفوتریک با گروه‌های سر زوئیتریونی (Zwitterionic) (۷۰). نحوهٔ انتخاب پراکنده‌کننده‌های مناسب مسئله کلیدی است. به‌طورکلی، زمانی که سیال پایه سیال قطبی است، باید سطح‌فعال‌های محلول در آب انتخاب شود. در غیر این صورت، موارد محلول در روغن انتخاب می‌شوند. اگرچه افزودن سطح‌فعال روشی مؤثر برای افزایش قابلیت پخش نانوذرات است، اما حضور سطح‌فعال‌ها ممکن است مشکلات زیادی ایجاد کند. به‌عنوان مثال، سطح‌فعال‌ها ممکن است محیط انتقال گرما را آلوده یا هنگام گرم‌شدن کف تولید کنند. علاوه‌براین، مولکول‌های سطح‌فعال متصل به سطوح نانوذرات ممکن است مقاومت گرمایی بین نانوذرات و زمینهٔ پایه را افزایش دهند که افزایش رسانایی گرمایی مؤثر را محدود می‌کند (۷۰،۷۱).

جدول ۴ خلاصه‌ای از پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ استفاده از سطح‌فعال‌ها برای پایداری نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در چند سال اخیر را نشان می‌دهد. از بین پژوهش‌های مرورشده در این مقاله در بخش استفاده از سطح‌فعال‌ها، در خصوص میزان درصد مورد استفاده از سطح‌فعال‌ها همچون SDBS، SDS، SSL و سایر سطح‌فعال‌ها شامل صمغ عربی و PVP جمع‌بندی کلی صورت گرفته و نتایج به‌صورت نموداری در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین درصد استفاده از سطح‌فعال مربوط به ماده SDBS، سپس SDS و بعد از آن SSL است که می‌توان نتیجه گرفت، سطح‌فعال SDBS در مقایسه با دیگر سطح‌فعال‌ها برای پایداری نانوذرات در تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

کاظمی و همکاران (۶۵) رسانایی گرمایی و سرعت گرمایش پارافین خالص و پارافین حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ابتدا MWCNT را با غلظت‌های ۰/۲ و ۰/۵ درصد جرمی به PCM اضافه کردند. به‌منظور جلوگیری از تجمع، تعلیقی آماده‌شده

جدول ۴ خلاصه‌ای از پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ استفاده از سطح‌فعال‌ها در تهیهٔ نانوکامپوزیت مادهٔ تغییرفازدهنده

Table 4. A summary of the researches carried out in the field of using surface agents in the preparation of nanocomposite of phase change material

Reference	PCMs suggested	Nanoparticles	Surfactant	Remarks
Zeng et al. (2009) (59)	Palmitic acid	Multiwalled nanotubes (MWNTs)	Setyl trimethyl ammonium bromide And SDBS	The results of the DSC curves showed that there is no significant change in the melting and freezing point and the phase change characteristics of palmitic acid are not affected by the addition of MWNTs and surfactants, regardless of the type of MWNTs and surfactants added.
Choi et al. (2014) (60)	Stearic acid	Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), graphite and graphene	PVP	The obtained results showed that the stability of PCM dispersion without adding surfactant for MWCNT, graphite, and graphene for at least 7, 2, and 5 days, respectively, and with the addition of surfactant as stabilizer, dispersion stability lasted for at least 10, 3, and 8 days. These results showed the effect of adding surfactant on increasing the good dispersion stability of the fabricated nanocomposite.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

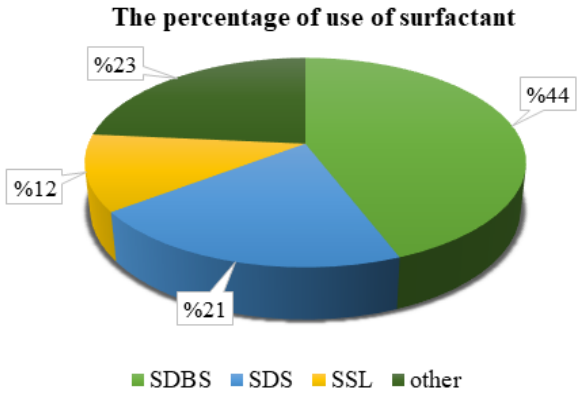
Nourani et al. (2016) (34)	Paraffin	Aluminum oxide (Al_2O_3)	SSL	In this study, in order to check the stability of the sample, the thermal cycle test was performed. All nanocomposites showed good thermal reliability after 120 thawing and freezing cycles.
Sharma et al. (2016) (33)	Palmitic acid	Titanium Dioxide (TiO_2)	SDBS	Accelerated thermal cycling test on nanoparticle-enhanced phase change material showed that the prepared composite material does not lose its thermal and chemical properties even after a large number of melting and freezing cycles.
Silakhori et al. (2015) (61)	Palmitic acid/polypyrrole (PA/PPy) stable phase change material	Graphene Nanoplatelets (GNPs)	SDS	In this study, SDS has been used as a surfactant to stabilize the nanoparticles inside the PCM base.
Cui et al. (2016) (55)	Sodium acetate trihydrate	copper (Cu)	SDS	After 50 cycles of melting and freezing, the degree of supercooling of the composites containing 0.5% copper nanoparticles is still very low (about 1°C) and its latent heat does not decrease much compared to the initial melting, which indicates good stability of the nanocomposite.
Sami and Etesami (2017) (3)	Paraffin	TiO_2	SSL	In this study, a decrease in the melting temperature and latent heat of the samples and a slight decrease in the dispersion of nanoparticles in nanocomposites were observed after 80 heating cycles. However, the distribution of nanoparticles in the nanocomposite with SSL surfactant was still better than the nanocomposite without it.
Bahirai et al. (2017) (15)	Paraffin wax	carbon nanofibers (CNF), Graphene nanoplatelets (GNP) and Graphite nanopowder	PVP-40	A very small amount of polyvinylpyrrolidone-40 was added to the mixture as a dispersing additive to ensure good dispersion of the nanoparticles in the liquid PCM. For each nanoparticle, four samples with different weight fractions of carbon additives are prepared. The stability of each nanocomposite is evaluated by successive thermal cycles to ensure the homogeneity of the samples during the thawing/freezing cycles.
Liu & Rao et al. (2017) (58)	Paraffin	Graphene and Exfoliated graphite sheet	SDS and SDBS	The results of the investigation showed that the addition of surfactant leads to an increase in the stability of composites. In addition, more than 50 times of heating and cooling cycle tests were performed to ensure dispersion stability and thermal properties.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Ezhumalai et al. (2018) (63)	Palmitic acid	copper oxide (CuO)	SDBS	The results of DSC analysis after 1000 heating cycles showed small changes in the phase change temperature and latent heat for melting and freezing of the sample, and these small deviations did not have any adverse effect on the stability of the nanocomposite for long-term operation.
Dsilva Winfred Rufuss et al. (2018) (16)	Paraffin	TiO_2, CuO and graphene oxide (GO)	SDBS	In this research, SDBS was added to base PCM with a mass ratio of 1:1 to ensure the stability and homogeneous dispersion of nanoparticles as a surfactant.
Haghighi et al. (2019) (72)	Paraffin	TiO_2, CuO and graphene	SDS	SDS was added as a surfactant to achieve a homogeneous composite during the composite preparation process.
Harikrishnan et al. (2019) (66)	Myristic acid	silicon dioxide (SiO_2)	SDBS	By conducting DSC analysis after 1000, 2000, 3000, and 4000 thermal cycles, the fabricated nanocomposite showed good thermal stability for long-term operation.
Sivasamy et al. (2019) (31)	Myristic acid	Silver (Ag)	SDBS	The results of comparing the thermal conductivity of the sample before and after 4000 heating cycles showed a decrease in thermal conductivity for nanocomposites.
Ouikhalfan et al. (2019) (26)	Myristic acid	Al_2O_3, TiO_2, CuO and zinc oxide (ZnO)		Nanoparticle-enhanced phase change materials in this study were subjected to 500 thermal cycles and showed good thermal stability, as the latent heat storage properties remained unchanged after thermal cycles, indicating good chemical stability of the sample.
Kazemi et al. (2019) (65)	Paraffin	MWCNTs	Gum Arabic	Since any nanoparticle-enhanced phase change material requires a surfactant to stabilize. Therefore, gum arabic (GA) is added to the phase change agent as a surfactant.
Bahari et al. (2019) (73)	Paraffin	α-Al_2O_3	SDBS	Surfactant sodium dodecylbenzene sulfate was added to surround the nanoparticles and prevent their aggregation to stabilize the nanocomposite during the process.
Zhang et al. (2020) (74)	octadecanol	MWCNTs	SDS	In this study, SDS was used to stabilize nanoparticles in the base matrix.
George et al. (2020) (19)	Paraffin wax	Conductive polyaniline (PANI) and CuO	Triton X-100	The thermal stability of paraffin wax and its composite was determined using an accelerated thermal cycle, and the results of the DSC analysis showed acceptable stability after 0, 100, and 200 thermal cycles.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Prabhu & ValanAra-su (2020) (75)	Paraffin wax	Titanium dioxide-silver binary composite (TiO2-Ag)	SSl, SDS and SDBS	The uniform dispersion and stability of nanocomposite particles in paraffin wax after 100 heating cycles were confirmed by the results of SEM analysis.
Arshad et al. (2020) (21)	RT-35HC Commercial paraffin	TiO2	SDBS	To achieve uniform dispersion of TiO2 in RT-35HC, surfactant (SDBS) was added to RT-35HC liquid at a ratio of 4:1 surfactant to nanoparticles.
Sivashan-kar et al. (2020) (67)	Paraffin	GNP	Sodium dexochlo-rate	Sodium deoxycholate surfactant was added to liquid PCM with 0.75 volume percent for uniform dispersion of nanoparticles in the base matrix.
Laghari et al. (2022) (22)	Paraffin wax	Titanium diox-ide-graphene binary composite (TiO2-Gr)	SDBS	Thermal stability for paraffin wax, nanocomposite prepared with TiO2 and binary nanocomposite after 0 and 300 heating cycles by analyzing the results of TGA, DSC, and FTIR analysis clearly showed the chemical and thermal stability of the nanocomposite.
Sheikh et al. (2023) (23)	A bio-based phase change material	graphite	SSL, SDS and SDBS	This experiment was initially conducted with a 1:1 ratio of mass fraction of graphite to surfactant. However, due to unstable solution yield after successive heating cycles, the mass fraction of graphite to surfactants was chosen with a ratio of 1 to 3. This resulted in a stable solution except in the case of nanocomposites made with SSL.



شکل ۶ درصد سطح‌فعال‌های مورد استفاده در پژوهش‌های اخیر
Figure 6. The percentage of surface agents used in recent researches

حدود نیم ساعت با استفاده از فراصوت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شد. سپس از صمغ عربی (GA) به‌عنوان سطح‌فعال استفاده شد و تعلیقی مجدداً در حمام فراصوت قرار گرفت و به مدت ۱/۵ ساعت به‌شدت هم زده شد تا نانوPCM به‌خوبی یکنواخت شود. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که پارافین حاوی ۰/۲ و ۰/۵ درصد جرمی از MWCNT می‌تواند رسانایی گرمایی را به‌ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۴۹٪ نسبت به پارافین خالص افزایش دهد.

۲-۷ اصلاح سطح نانوذرات

استفاده از نانوذرات اصلاح‌شده رویکردی امیدوارکننده برای دستیابی به پایداری طولانی‌مدت نانوکامپوزیت است. این روش بدون استفاده از سطح‌فعال است (۷۰). اصلاح سطح مناسب نانوذرات می‌تواند چسبندگی بین نانوذرات و زمینهٔ PCM را افزایش دهد و باعث افزایش گرمای نهان نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده شود. در حال حاضر، اصلاح عمدتاً با روش‌هایی مانند آمایش اسیدی، آمایش قلیایی و پیوند شیمیایی انجام می‌شود (۱۴).

آگیلا وی (Águila V) و همکاران (۶۴) در یک مطالعهٔ

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

تجربی تأثیر دما و غلظت نانوذرات را بر رسانایی گرمایی و گرانروی نانوکامپوزیت با اکتادکان به‌عنوان سیال پایه و نانوذراتCuO بررسی کردند. سه نانوPCM با روش دومرحله‌ای تهیه شدند که مرحلهٔ اول شامل اصلاح نانوذرات CuO با اولئات‌سدیم (Sodium Oleate) و مرحلهٔ دوم پراکنش نانوذرات با هم‌زدن فراصوت بود. اصلاح سطح نانوذرات CuO با اولئات‌سدیم توسط آزمون FT-IR تأیید شد و برای پراکنش کامل نانوذرات، فرایند فراصوت به‌مدت یک ساعت انجام شد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که هر چه میزان نانوذرات بیشتر باشد، رسانایی گرمایی نانوPCM بیشتر است. در این مورد، بیشترین افزایش مشاهده‌شده در رسانایی گرمایی نانوPCM نسبت به مادهٔ اولیه، ۹/۳۲ درصد برای غلظت ۱۰ درصد وزنی نانوذرات در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود.

۸ کاربردهای نانوکامپوزیت مادهٔ تغییرفازدهنده

امروزه استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در صنایع مختلف کاربرد زیادی پیدا کرده است (۷۶،۷۷). مواد تغییرفازدهندهٔ بهبودیافته با نانوذرات با توجه به بالا بودن ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی آن‌ها و هدایت گرمایی مناسب، در چند سال اخیر بیشتر مورد توجه واقع شده‌اند. از جمله زمینه‌های کاربرد این مواد، می‌توان به استفاده از آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی (۷۸–۸۱)، مدیریت گرمایی باتری یون‌لیتیومی (۸۲،۸۳)، بازیابی گرما، کاربرد در مصالح ساختمانی (۸۴) و خنک‌کاری قطعه‌های الکترونیکی (۸۵،۸۶) اشاره کرد. طرح‌واره‌ای از کاربرد نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در زمینه‌های مختلف در شکل ۷ آمده است. می‌توان در زمینه‌هایی که PCM به‌کارگرفته شده است و نیاز به خواص گرمایی بالاتر و بهتر وجود دارد، از نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده متناسب با شرایط به‌عنوان جایگزین برای PCMها استفاده کرد. در ادامه به پژوهش چند محقق در مورد کاربردهای نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده در زمینه‌های مختلف اشاره شده است.

وارزوها و فلایشر (Warzoha & Fleischer) (۸۷) طی مطالعه‌ای تجربی به‌منظور بازیابی گرما، مقدار انرژی قابل‌استخراج از چهار نانوکامپوزیت مواد تغییر فازدهنده مختلف (گرافن-پارافین، MWCNT-پارافین، Al-پارافین و TiO_2-پارافین، هر کدام در سطح بارگذاری ۲۰ درصد حجمی) را با استفاده از سلول آزمایش گرمایی گذرا به نام واحد نگه‌داری گرمایی (Thermal Containment Unit) تعیین کردند. پاسخ گرمایی درون TCU طی چرخه‌های ذوب و انجماد مجدد نشان داد که نانوذرات مبتنی بر کربن به‌شدت زمان ذوب و انجماد مجدد PCM را در مقابل PCMهای نانوکامپوزیتی Al-پارافین و TiO_2-پارافین کاهش می‌دهند. گرافن بیشترین کاهش را در کل زمان ذوب و انجماد مجدد با ۳۰ درصد ایجاد کرد که به‌دلیل افزایش ۲۸۰۰ درصدی رسانایی گرمایی PCM ناشی از ادغام نانوذرات گرافن با مقدار ۲۰ درصد حجمی بود. همچنین مشخص شد که گرافن تقریباً ۱۳٪ افزایش در آنتالپی تغییر فاز پارافین خالص در سطح بارگذاری ۲۰ درصد حجمی ایجاد می‌کند. نانوذرات دیگر منجر به کاهش حداقل ۱۵ درصدی در آنتالپی تغییر فاز مطلق PCM شدند. در نهایت، مقدار انرژی گرمایی قابل‌بازیافت از PCMهای نانوکامپوزیت در TCU با بررسی میزان انرژی تحویل‌داده‌شده به صفحهٔ سرد طی چرخهٔ خنک‌کننده ارزیابی شد. قابل‌توجه است که مقدار انرژی گرمایی قابل‌بازیافت از نانوکامپوزیت مواد تغییر فازدهنده گرافن-پارافین تقریباً ۱۱ درصد بیشتر از آن چیزی است که می‌توان از پارافین پایه بازیافت کرد؛ درحالی‌که هر یک از PCMهای نانوکامپوزیت دیگر حداقل ۱۵ درصد کاهش در مقدار انرژی گرمایی قابل‌بازیافت از PCM در مقابل پارافین پایه را نشان دادند. بنابراین، در این مطالعه برای اولین بار به‌صورت تجربی نشان داده شد که وجود سطوح بارگذاری بالای گرافن در PCMهای مبتنی بر پارافین منجر به افزایش مقدار انرژی گرمایی می‌شود که می‌توان از PCM در کاربرد بازیافت کرد.

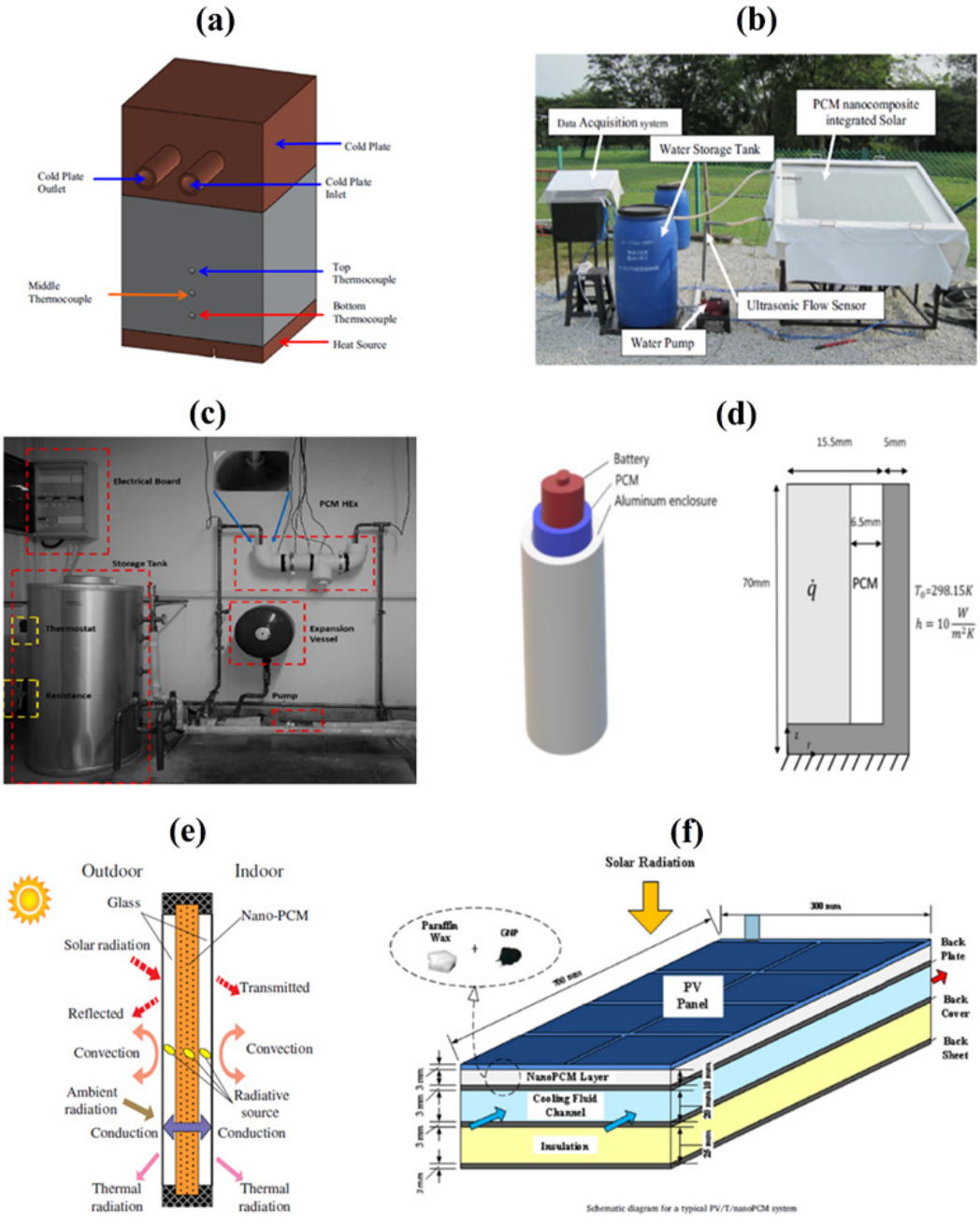
لین و آل‌کییم (Lin & Al-Kayiem) (۶۲) برای ارزیابی ذخیرهٔ انرژی گرمایی در آبگرمکن خورشیدی، نانوذرات مس را در موم پارافین برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های Cu-PCM پراکنده و نمونهٔ نانوکامپوزیت‌های تولیدشده را برای بررسی خواص گرمایی تهیه کردند. نتایج تجربی نشان داد که رسانایی گرمایی موم پارافین با اضافه‌شدن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی نانومس به موم پایه به‌ترتیب ۱۴، ۲۳/۹، ۴۲/۵ و ۴۶/۳ درصد افزایش یافت. تغییر دمای ذوب و انجماد نشان داد که نانومس به‌عنوان عامل هسته‌زایی برای کاهش اثر اَبَرسرمایش در طول فرایند تغییرفاز عمل کرده است. همچنین نانومس پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های Cu-PCM را بدون تغییر ساختار شیمیایی، بهبود بخشید و بازدهی ذخیره‌سازی انرژی را به‌میزان ۱/۷٪ برای زمانی که ۱٪ نانومس به موم پارافین اضافه شده بود، افزایش داد. این نتایج حاکی از آن بود که افزودن نانومس می‌تواند به‌خوبی برای ذخیره‌سازی گرمایی آبگرمکن خورشیدی به‌خصوص هنگام شب و در زمانی که تابش خورشیدی در دسترس نیست، قابل‌استفاده باشد.

نیتسا و کوروناکی (Nitsas & Koronaki) (۸۸) شبیه‌سازی سلول گرمایی را با استفاده از پره‌های استوانه‌ای به‌عنوان چاهک (Sink) گرمایی به‌منظور بهبود رسانایی گرمایی ورق آلومینیوم گرمایی انجام دادند. آن‌ها عملکرد ذخیره‌سازی گرمایی (TES) موم پارافین (RT۳۵HC) مخلوط‌شده با نانوذرات مس را با استفاده از سامانه سلول‌های گرمایی شبیه‌سازی‌شده مورد

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

آزمایش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت گرمای نهان نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده ۱۱/۵ درصد کاهش داشته، اما همچنان ۲۵/۳ درصد کاهش در مدت زمان ذخیرهٔ انرژی گرمایی دارد.

زو (Zou) و همکاران (۶۸) برای بهبود عملکرد سامانه مدیریت گرمایی باتری یون‌لیتیومی، مواد تغییرفاز مرکب (PCM) را بر پایه نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNT)، گرافن و MWCNT/گرافن تهیه و به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. PCM کامپوزیتی مبتنی بر MWCNT و گرافن نه‌تنها می‌تواند رسانایی گرمایی را بهبود بخشد، بلکه از افزایش سریع دما در PCM مایع نیز جلوگیری می‌کند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که رسانایی گرمایی با اضافه‌شدن گرافن به PCM در مقایسه با MWCNT بیشتر بهبود یافته است. علاوه‌براین، افزودن کربن نه‌تنها رسانایی گرمایی را بهبود می‌بخشد، بلکه گرانروی PCM مایع را نیز افزایش



شکل ۷ طرحواره زمینه‌های به‌کارگیری نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده (a) محفظه گرمایی به‌منظور بازیابی گرما (۸۷)، (b) راه‌اندازی آزمایشی آبگرمکن خورشیدی (۶۲)، (c) دستگاه آزمایشی برای اندازه‌گیری TES (۳۷)، (d) طرحواره واحد بهبود عملکرد سامانه مدیریت گرمایی باتری یون‌لیتیومی (۴۱)، (e) طرحواره انتقال گرما در پنجره لعاب‌دار (۸۹)، (f) طرحواره سامانه PV/T/NanoPCM معمولی (۹۰)

Figure 7. Scheme of the fields of application of nanoparticle-enhanced phase change materials: (a) thermal chamber for heat recovery (87), (b) experimental setup of the solar water heater (62), (c) test device for measuring TES (37), (d) schematic of the performance improvement unit of the thermal management system of the lithium-ion battery (41), (e) schematic of heat transfer in a glazed window (89), (f) schematic diagram for a typical PV/T/Nano PCM system (90)

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

می‌دهد که بر انتقال گرما تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، PCM کامپوزیتی با نسبت جرمی MWCNT/گرافن ۳ به ۷ دارای بالاترین رسانایی گرمایی بود که در مقایسه با PCM کامپوزیتی مبتنی بر گرافن، PCM کامپوزیتی مبتنی بر MWCNT و PCM خالص به‌ترتیب ۳۱/۸، ۵۵/۴ و ۱۲۴ درصد افزایش از خود نشان داد. همچنین بالا بودن نرخ رسانایی گرمایی در PCM کامپوزیتی MWCNT/گرافن موجب ایجاد بالاترین نرخ افزایش و کاهش دما به‌ترتیب به میزان ۶۳/۳ و ۵۰٪ نسبت به PCM خالص شد. بنابراین این PCM کامپوزیتی نه‌تنها رسانایی گرمایی بالاتری دارد، بلکه می‌تواند از افزایش سریع دمای PCM مایع نیز جلوگیری کند که پتانسیل زیادی برای مدیریت گرمایی باتری یون‌لیتیومی نشان می‌دهد.

لی (Li) و همکاران (۸۹) اثر استفاده از موم پارافین در پنجره‌های دوجداره را به عنوان روشی جدید برای کاهش مصرف انرژی و تنظیم دمای گرمایی داخلی ساختمان‌ها بررسی کردند. در این مطالعه، عملکرد گرمایی پنجره‌های لعاب‌دار حاوی نانوPCM از نظر آسایش گرمایی و مصرف انرژی از نظر تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با مدل توسعه‌یافته مقایسه شد. تجزیه‌وتحلیل اثر کسر حجمی و قطر ذرات بر روی پنجره لعاب‌دار تحت شرایط واقعی محیطی نشان داد که هرچه کسر حجمی نانوذرات بیشتر باشد، مصرف انرژی بیشتر است و با قطر ذرات بزرگ‌تر، مصرف انرژی کمتر خواهد بود. حداقل مصرف انرژی با غلظت نانوذرات ۱٪ و قطر نانوذرات ۱۰۰ نانومتر برای تمام فصول به‌دست آمد. همچنین میزان تأثیر پارامترهای مورد مطالعه در فصل زمستان بیشتر بود. از سوی دیگر، مصرف انرژی با انتخاب مناسب کسر حجمی نانوذرات و اندازه نانوذرات تا ۴ درصد کاهش یافت.

عبدالرازک (Abdelrazik) و همکاران (۹۰) بررسی عددی اثر نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده را بر عملکرد گرمایی و الکتریکی سامانه‌های فتوولتایی/گرمایی (PV/T)هیبریدی انجام دادند. آن‌ها به‌عنوان راه‌حل نهفته دو سامانهٔ ماژول هیبریدی مواد تغییرفازدهنده/ فتوولتایی (PV/PCM) و سامانه PV/Tرا همراه با افزودن درصدهای مختلفی از نانوذرات به PCM که منجر به افزایش رسانایی گرمایی آن می‌شود، ترکیب کردند. همچنین آن‌ها با استفاده از مدل تأییدشده عددی، تأثیر لایه‌ای از مواد تغییرفازدهندهٔ بهبودیافتهٔ نانو (NanoPCM)، واقع در زیر پانل PV، بر عملکرد گرمایی و الکتریکی PV/T هیبریدی را ارزیابی و اثر آب‌وهوای مختلف و شرایط عملیاتی را نیز بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که سامانه PV/T هیبریدی همراه با PCM (PV/T/PCM) عملکرد بهتری در مقایسه با سامانه PV مستقل دارد. همچنین گنجاندن درصدهای مختلفی از نانوصفحات‌های گرافن (GNP) در موم پارافین به‌عنوان PCM خنک‌سازی پنل PV را افزایش و بازده الکتریکی بالاتری را نشان می‌دهد و با افزایش درصد بارگذاری نانوذرات، دمای پانل PV کاهش و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد. از نتایج این مطالعه مشخص است که به‌طور کلی تأثیر نانوذرات بر جذب گرما توسط سیال خنک‌کننده و تغییرات بازده گرمایی به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد اما در بیشتر موارد، بارگذاری کم نانوذرات منجر به افزایش رسانایی گرمایی می‌شود.

۹ نتیجه‌گیری

پژوهشگران برای مطالعه و تحقیق بر روی نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده به پیش‌زمینهٔ کلی از این مواد نیاز دارند تا از مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در این مورد آگاهی یافته و به چالش‌های پیش رو بپردازند. مقالهٔ حاضر با هدف بررسی اجمالی مطالعات انجام‌شده بر نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، یافتن چالش‌های موجود در این زمینه و ارائهٔ موضوعاتِ کمتر مطالعه‌شده نگاشته شده است. بنابراین در این مطالعه به روش‌های تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده، خواص گرمایی، پایداری نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده و کاربرد مواد تغییرفازدهنده بهبودیافته با نانوذرات اشاره شده است و با کنار هم قرار دادن تعدادی از پژوهش‌ها به تحلیل نتایج آن‌ها و بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد در میان خواص گرمایی، رسانایی گرمایی، گرمای نهان، دمای تغییر فاز و پایداری گرمایی مهم‌ترین خواصی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. نتایج حاصل از این مطالعه و مقایسهٔ آن‌ها به‌طور خلاصه نشان می‌دهد:

* با توجه به آنکه پژوهش‌های مطالعه‌شده در مقالهٔ حاضر از محموعه مقالاتی است که از PCMهای آلی به‌عنوان مادهٔ تغییرفازدهنده استفاده کرده است، می‌توان مشاهده کرد که از میان دسته‌بندی PCM های آلی پارافین‌ها و اسیدهای چرب به‌دلیل خورندگی و اَبَرسرمایش کم، صرفهٔ اقتصادی، محدودهٔ دمای ذوب مناسب و سازگاری خوب با نانوذرات بیشتر مورد توجه بوده، عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج خوبی ارائه کرده است.

* نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده از میان دسته‌بندی‌های موجود برای مواد نانوساختار، نانوذرات فلزی و نانوذرات اکسید فلزی رسانایی گرمایی را نهایتاً تا ۲۰۰ درصد بهبود بخشیده‌اند. اما افزایش رسانایی گرمایی برای نانوذرات کربنی که رسانایی گرمایی بالاتری نسبت به سایر نانوذرات دارند، به بیش از ۱۰۰ یا ۲۰۰ درصد و گاهی به بالاتر از ۱۰۰۰ درصد نیز

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

می‌رسد.

* در میان به‌کارگیری مواد نانوساختار نانوذرات اکسید فلزی به‌دلیل پایداری بهتر نسبت به نانوذرات فلزی، در دسترس بودن و صرفهٔ اقتصادی آن‌ها و نانوذرات کربنی با وجود هزینهٔ بالا اما رسانایی گرمایی بالاتر نسبت به سایر نانوذرات کاربرد وسیع‌تری داشته و تقریباً ۸۰ درصد حجم پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین قابل‌ذکر است که درصد استفاده از نانوذرات اکسید فلزی، نانوذرات فلزی و نانوذرات کربنی در پژوهش‌های بررسی‌شده در این مطالعه به‌ترتیب در حدود ۰/۱ تا ۱۵ درصد وزنی، ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزنی و ۰/۰۰۱ تا ۱۵ درصد وزنی بوده است که با وجود مطالعات وسیع در این زمینه این محدوده می‌تواند متغیر باشد.

* به‌طور کلی امروزه علاوه‌بر استفاده از نانوذره برای بهبود خواص PCMها می‌توان از ذرات نانوکامپوزیتی که از ترکیب دو نانوذره با خواص نزدیک به هم تشکیل می‌شوند، استفاده کرد و تأثیر آن را بر خواص گرمایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار داد و به‌طور گسترده‌تر در مطالعات آینده با نانوذرات متفاوت در این زمینه تحقیق کرد.

* نتایج به‌دست‌آمده از تمامی پژوهش‌ها به‌وضوح افزایش رسانایی گرمایی PCMها را با افزودن نانوذرات نشان می‌دهد. اما نکتهٔ حائز اهمیت در مورد افزودن نانوذرات استفاده از میزان بهینهٔ آن‌هاست؛ زیرا اگر میزان نانوذرات بالاتر یا پایین‌تر از حد بهینه انتخاب شود، خواص دیگر نانوکامپوزیت را تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش آن می‌شود.

* مسئلهٔ مهم در رابطه با انتخاب درصد بهینهٔ نانوذرات آن است که میزان بهینهٔ نانوذره با تغییر شرایط و استفاده از PCMها متفاوت تغییر خواهد کرد و به‌طور قاطع نمی‌توان اعلام کرد که برای نانوذره مشخص میزان بهینه عددی ثابت باشد. این میزان بهینه تنها با انجام آزمایش‌هایی با به‌کارگیری درصدهای متغیر از نانوذرات و تکرار آن‌ها و سپس بررسی نتایج حاصل از آن و تعیین آن میزان از نانوذره که بیشترین افزایش رسانایی گرمایی را در برداشته و خواص دیگر را نیز به صورت ناچیز تحت تأثیر قرار داده باشد، مشخص می‌شود.

* افزودن مواد نانوساختار به مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش پدیدهٔ اَبَرسرمایش و بهبود خواص گرمایی این مواد می‌شود و با انتخاب مناسب نوع، اندازه و غلظت مواد نانوساختار، می‌توان به خواص گرمایی مطلوب در نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده دست یافت.

* در رابطه با تهیهٔ نانوکامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده بررسی‌ها نشان داد که از میان دو روش یک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای روش دوم به‌دلیل فرایند ساده و کم‌هزینهٔ آن و مناسب بودن برای تمامی نانوذرات بیشتر در دست بررسی قرار گرفته، بر روی آن مطالعه شده و نتایج خوبی ارائه کرده است.

* در روش دومرحله‌ای پراکنش نانوذرات درون PCM پایه به چند روش امکان‌پذیر است که از میان این روش‌ها استفاده از همزن مغناطیسی و فرایند فراصوت پراستفاده‌ترین روش در پژوهش‌های موجود است که عملکرد خوبی را از خود نشان داده است.

* با توجه به آن‌که مهم‌ترین چالش در روش دومرحله‌ای تجمع نانوذرات درون PCM است، بنابراین پیدا کردن راه‌حل این چالش حائز اهمیت بوده و برای حل آن دو روش استفاده از سطح‌فعال و اصلاح سطح نانوذرات مطرح می‌شود. مطالعات بررسی‌شده نشانگر آن است که برای دستیابی به پراکنش یکنواخت نانوذرات درون زمینهٔ پایه استفاده از سطح‌فعال به‌دلیل فرایند ساده و مقرون‌به‌صرفه آن بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده و برای همگن کردن محلول نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است.

* از میان سطح‌فعال‌های به‌کاررفته در پژوهش‌ها سه سطح‌فعال SDBS، SDS و SSL به‌دلیل سازگاری خوب آن‌ها با PCMها و پراکنش بهتر نانوذرات درون نانوکامپوزیت محبوبیت بیشتری داشته و نتایج خیلی خوبی ارائه کرده‌اند.

* نکتهٔ قابل‌تأمل در به‌کارگیری سطح‌فعال‌ها در نانوکامپوزیت‌ها درصد استفادهٔ آن‌ها نسبت به نانوذرات است. این نسبت در صورتی که رعایت نشود و به میزان کمتر مورد استفاده قرار گیرد، منجر به تجمع نانوذره و اگر بیشتر از میزان بهینه مصرف شود، منجر به ته‌نشینی سطح‌فعال به‌عنوان ناخالصی می‌شود. بنابراین این نسبت نیز باید با انجام آزمایش‌های مختلف و استفاده از نسبت‌های متفاوت به میزان بهینه انتخاب شود. بررسی پایداری نمونه پس از ساخت نانوکامپوزیت و انجام آزمون چرخه‌های گرمایی بر نمونه و عدم مشاهدهٔ تجمع نانوذره و یا ته‌نشینی سطح‌فعال نشان از انتخاب درست نسبت بهینهٔ سطح‌فعال به نانوذره خواهد بود.

* انجام آزمون چرخه‌های گرمایی به‌منظور بررسی پایداری خواص گرمایی نانوکامپوزیت به‌دلیل اطمینان یافتن از پایداری نانوذرات درون نمونه طی سرمایش و گرمایش‌های متوالی نانوکامپوزیت ساخته‌شده و عدم تغییر در خواص گرمایی آن امروزه به مسئلهٔ مهمی تبدیل شده و بیشتر مورد توجه پژوهشگران است. بنابراین با توجه به جای خالی این موضوع در اکثر مطالعات اخیر در هر پژوهش لازم است با توجه به نوع سطح‌فعال و نوع نانوذره به‌کاررفته، پایداری گرمایی نمونه مورد بررسی قرار گیرد.

* در زمینهٔ کاربردها، چالش‌های زیادی در استفاده

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

از مـواد تغییرفازدهنـدهٔ تقویت‌شـده بـا نانـوذرات در کاربردهـای مختلـف وجـود دارد. در ایـن بررسـی، اسـتفاده از نانوکامپوزیت‌هـا به‌منظـور بازیابـی گرمـا، اسـتفاده از انـرژی خورشـیدی، تقویـت سـامانه‌های TES، مدیریـت گرمایـی الکترونیـک و مصالـح سـاختمانی بررسـی شـده اسـت و ایـن تنهـا قسـمت کوچکـی از کاربردهـای متنـوع ایـن مواد اسـت. بنابرایـن پژوهشـگران در آینـده بایـد بـا درنظرگرفتـن صرفـهٔ اقتصـادی و اثـرات زیسـت‌محیطی مـواد تغییرفازدهنـدهٔ تقویت‌شـده بـا نانـوذرات امـکان اسـتفادهٔ ایمـن و اقتصـادی از ایـن مـواد را فراهـم کـرده و عملکـرد گرمایـی آن‌هـا را در صنایـع مختلـف افزایـش دهنـد.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

مراجع

1. Masoumi H. Investigating the stability of phase change nanomaterials for use in thermal energy storage. In: Power Research Institute Research group of cycle and heat exchangers. 2020.

2. Ali S, Deshmukh SP. An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. Mater Today Proc [Internet]. 2019;26(xxxx):1231–7.

3. Sami S, Etesami N. Improving thermal characteristics and stability of phase change material containing TiO_2 nanoparticles after thermal cycles for energy storage [Internet]. Vol. 124, Applied Thermal Engineering. 2017. 346–352 p.

4. Zarezadeh Z, Basharat A, Antique M, Zohri sh, Alizadeh Z, Hassanzadeh M, Heat transfer control methods in temperature regulating textiles, Iran Chemical Engineering 22 (2023) 43-70.

5. Rostamian F, Etesami N, Mehrali M. Microencapsulation of eutectic phase change materials for temperature management of the satellite electronic board. Appl Therm Eng [Internet]. 2024;236:121592.

6. Rezaei Khuzani R, Etesami N, Preparation of Perlite/Phase Change Material Composite and Improvement of Its Thermal Properties Using Silica Nanoparticles for Energy Optimization in the Construction Industry, 6th International Conference on Optimal Management and Development of Energy Infrastructure (1401).

7. Rostamian F, Etesami N, Haghgoo M. Management of electronic board temperature using heat sink containing pure and microencapsulated phase change materials. Int Commun Heat Mass Transf [Internet]. 2021;126:105407.

8. Sami S, Etesami N, Enhancement of Thermal Performance of Phase Change Materials via Microencapsulation, 2nd International Conference on Novel Research Findings in Chemistry and Chemical Engineering (2016).

9. Sami S, Etesami N. Heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material by addition of nanoparticles for a latent heat thermal energy storage system. Energy Reports [Internet]. 2021;7:4930–40.

10. Rastmian F, Etesami N, Preparation and Characterization of Microencapsulated Stearic Acid Phase Change Material with a Titania Shell for Thermal Energy Storage, 17th National Iranian Congress of Chemical Engineering (2021).

11. Rastmian F, Etesami N, Haghgoo M, Control of Electronic board temperature using heat sink containing stearic acid as a phase change material, Journal of Mechanical Engineering, serial number 97, volume 51, number 4, winter 2021, page 441-443.

12. Motahar, Investigation of Methods for Enhancing Heat Transfer in Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, 1st National Conference on Sustainable Building and Energy (Challenges, Necessities, and Solutions) (2018).

13. Rastmian F, Etesami N, Haghgoo M, A comprehensive review on the use of phase change materials in cooling of electronic board, Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University, serial number 98, volume 52, number 1, spring 2022, page 359-368.

14. Amudhalapalli GK, Devanuri JK. Synthesis, characterization, thermophysical properties, stability and applications of nanoparticle enhanced phase change materials – A comprehensive review. Therm Sci Eng Prog [Internet]. 2022;28(April 2021):101049.

15. Bahiraei F, Fartaj A, Nazri GA. Experimental and numerical investigation on the performance of carbon-based nanoenhanced phase change materials for thermal management applications. Energy Convers Manag [Internet]. 2017;153(August):115–28.

16. Dsilva Winfred Rufuss D, Suganthi L, Iniyan S, Davies PA. Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity. J Clean Prod. 2018;192:9–29.

17. Masoumi H, Haghighi khoshkhoo R, Mirfendereski SM. Modification of physical and thermal characteristics of stearic acid as a phase change materials using TiO_2-nanoparticles. Thermochim Acta [Internet]. 2019;675:9–17.

18. He M, Yang L, Lin W, Chen J, Mao X, Ma Z. Preparation, thermal characterization and examination of phase change materials (PCMs) enhanced by carbon-based nanoparticles for solar thermal energy storage. J Energy Storage [Internet]. 2019;25(April):100874.

19. George M, Pandey AK, Abd Rahim N,

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Tyagi V V., Shahabuddin S, Saidur R. A novel polyaniline (PANI)/ paraffin wax nano composite phase change material: Superior transition heat storage capacity, thermal conductivity and thermal reliability. Sol Energy [Internet]. 2020;204(April):448–58.

20. Kabeel AE, Sathyamurthy R, Manokar AM, Sharshir SW, Essa FA, Elshiekh AH. Experimental study on tubular solar still using Graphene Oxide Nano particles in Phase Change Material (NPCM's) for fresh water production. J Energy Storage [Internet]. 2020;28(December 2019):101204.

21. Arshad A, Jabbal M, Shi L, Darkwa J, Weston NJ, Yan Y. Development of TiO2/RT–35HC based nanocomposite phase change materials (NCPCMs) for thermal management applications. Sustain Energy Technol Assessments [Internet]. 2021;43(October):100865.

22. Laghari IA, Samykano M, Pandey AK, Kadirgama K, Mishra YN. Binary composite (TiO_2-Gr) based nano-enhanced organic phase change material: Effect on thermophysical properties. J Energy Storage. 2022;51(5):1–12.

23. Sheikh Y, Orhan MF, Kanoglu M, Umair M, Mehaisi E. Effect on the Thermal Performance of a Bio-based Phase Change Material with the Addition of Graphite with Surfactants. Heat Transf Eng [Internet]. 2023;0(0):1–14.

24. Ali HM, Babar H, Shah TR, Sajid MU, Qasim MA, Javed S. Preparation techniques of TiO2 nanofluids and challenges: A review. Appl Sci. 2018;8(4).

25. Paul J, Kadirgama K, Samykano M, Pandey AK, Tyagi V V. A comprehensive review on thermophysical properties and solar thermal applications of organic nano composite phase change materials. J Energy Storage [Internet]. 2022;45(5):103415.

26. Ouikhalfan M, Sari A, Chehouani H, Benhamou B, Biçer A. Preparation and characterization of nano-enhanced myristic acid using metal oxide nanoparticles for thermal energy storage. Int J Energy Res. 2019;43(14):8592–607.

27. Zhang L, Feng G. A one-step-assembled three-dimensional network of silver/ polyvinylpyrrolidone (PVP) nanowires and its application in energy storage. Nanoscale. 2020;12(19):10573–83.

28. Xu B, Zhang C, Chen C, Zhou J, Lu C, Ni Z. One-step synthesis of CuS-decorated MWCNTs/paraffin composite phase change materials and their light–heat conversion performance. J Therm Anal Calorim [Internet]. 2018;133(3):1417–28.

29. Zhang P, Li J, Xie R, Shen J, Song L, Chen L. One-step strategy to construct GA/PEG shape-stabilized phase change material with excellent thermophysical properties. Diam Relat Mater [Internet]. 2020;103(December 2019):107716.

30. Xu B, Wang B, Zhang C, Zhou J. Synthesis and light-heat conversion performance of hybrid particles decorated MWCNTs/paraffin phase change materials. Thermochim Acta [Internet]. 2017;652:77–84.

31. Sivasamy P, Harikrishnan S, Hussain SI, Kalaiselvam S, Babu LG. Improved thermal characteristics of Ag nanoparticles dispersed myristic acid as composite for low temperature thermal energy storage. Mater Res Express. 2019;6(8).

32. Teng TP, Yu CC. Characteristics of phase-change materials containing oxide nano-additives for thermal storage. Nanoscale Res Lett. 2012;7:1–10.

33. Sharma RK, Ganesan P, Tyagi V V., Metselaar HSC, Sandaran SC. Thermal properties and heat storage analysis of palmitic acid-TiO2 composite as nano-enhanced organic phase change material (NEOPCM). Appl Therm Eng [Internet]. 2016;99:1254–62.

34. Nourani M, Hamdami N, Keramat J, Moheb A, Shahedi M. Thermal behavior of paraffin-nano-Al2O3 stabilized by sodium stearoyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity. Renew Energy [Internet]. 2016;88:474–82.

35. Babapoor A, Karimi G. Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffinnanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization. Vol. 90, Applied Thermal Engineering. 2015. p. 945–51.

36. Kibria MA, Anisur MR, Mahfuz MH, Saidur R, Metselaar IHSC. A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. Energy Convers Manag [Internet]. 2015;95:69–89.

37. Nourani M. Efficiency Increasing of an Indirect Solar Dryer Using Energy Storage sys-

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

tem Based on Phase Change Materials (Paraffin and Bitumen), and Study of the Thermal Properties and Physical Stability of Nano Al2O3-paraffin Composite. 2016.

38. Sayyar M, Weerasiri RR, Soroushian P, Lu J. Experimental and numerical study of shape-stable phase-change nanocomposite toward energy-efficient building constructions. Energy Build [Internet]. 2014;75:249–55.

39. Zabalegui A, Lokapur D, Lee H. Nanofluid PCMs for thermal energy storage: Latent heat reduction mechanisms and a numerical study of effective thermal storage performance. Int J Heat Mass Transf [Internet]. 2014;78:1145–54.

40. Wang J, Xie H, Xin Z, Li Y, Chen L. Enhancing thermal conductivity of palmitic acid based phase change materials with carbon nanotubes as fillers. Sol Energy [Internet]. 2010;84(2):339–44.

41. Heyhat MM, Mousavi S, Siavashi M. Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. J Energy Storage [Internet]. 2020;28(December 2019):101235.

42. M. Mehrali, S. T. Latibari, M. Mehrali, T. M. I. Mahlia, H. S. C. Metselaar, M. S. Naghavi, E. Sadeghinezhad ARA. Preparation and characterization of palmitic acid/graphene nanoplatelets composite with remarkable thermal conductivity as a novel shape-stabilized phase change material. Appl Therm Eng [Internet]. 2013;61(2):633–52.

43. Zheng X, Gao X, Huang Z, Li Z, Fang Y, Zhang Z. Form-stable paraffin/graphene aerogel/copper foam composite phase change material for solar energy conversion and storage. Sol Energy Mater Sol Cells [Internet]. 2021;226(April):111083.

44. Qiu J, Fan X, Shi Y, Zhang S, Jin X, Wang W, et al. PEG/3D graphene oxide network form-stable phase change materials with ultrahigh filler content. J Mater Chem A. 2019;7(37):21371–7.

45. Huang X, Lin Y, Fang G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. Sol Energy [Internet]. 2018;161(November 2017):187–93.

46. Putra N, Amin M, Kosasih EA, Luanto RA, Abdullah NA. Characterization of the thermal stability of RT 22 HC/graphene using a thermal cycle method based on thermoelectric methods. Appl Therm Eng [Internet]. 2017;124:62–70.

47. Solangi KH, Kazi SN, Luhur MR, Badarudin A, Amiri A, Sadri R, et al. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids. Energy [Internet]. 2015;89:1065–86.

48. Xiong Q, Hajjar A, Alshuraiaan B, Izadi M, Altnji S, Shehzad SA. State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: A review based on the type of the dispersed nanoparticles. J Clean Prod [Internet]. 2021;310(August 2020):127528.

49. Motahar S, Nikkam N, Alemrajabi AA, Khodabandeh R, Toprak MS, Muhammed M. Experimental investigation on thermal and rheological properties of n-octadecane with dispersed TiO2 nanoparticles. Int Commun Heat Mass Transf [Internet]. 2014;59:68–74.

50. Suresh Kumar KR, Kalaiselvam S. Experimental investigations on the thermophysical properties of CuO-palmitic acid phase change material for heating applications. Vol. 129, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. p. 1647–57.

51. Harikrishnan S, Deenadhayalan M, Kalaiselvam S. Experimental investigation of solidification and melting characteristics of composite PCMs for building heating application. Energy Convers Manag [Internet]. 2014;86:864–72.

52. Han D, Guene Lougou B, Xu Y, Shuai Y, Huang X. Thermal properties characterization of chloride salts/nanoparticles composite phase change material for high-temperature thermal energy storage. Appl Energy [Internet]. 2020;264(December 2019):114674.

53. Chaichan MT, Kamel SH, Al-Ajeely AMNM. Thermal Conductivity Enhancement By Using Nano-Material in Phase Change Material for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. Asian J Eng Appl Technol. 2015;2(2):52–7.

54. Sahan N, Paksoy HO. Thermal enhancement of paraffin as a phase change material with nanomagnetite. Sol Energy Mater Sol Cells [Internet]. 2014;126:56–61.

55. Cui W, Yuan Y, Sun L, Cao X, Yang X. Experimental studies on the supercooling and melting/freezing characteristics of nano-copper/sodium acetate trihydrate composite phase change materials. Renew Energy [Inter-

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

net]. 2016;99:1029–37. A

56. Wu SY, Wang H, Xiao S, Zhu DS. An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials. J Therm Anal Calorim. 2012;110(3):1127–31.

57. Al Ghossein RM, Hossain MS, Khodadadi JM. Experimental determination of temperature-dependent thermal conductivity of solid eicosane-based silver nanostructure-enhanced phase change materials for thermal energy storage. Int J Heat Mass Transf [Internet]. 2017;107:697–711.

58. Liu X, Rao Z. Experimental study on the thermal performance of graphene and exfoliated graphite sheet for thermal energy storage phase change material. Thermochim Acta [Internet]. 2017;647:15–21.

59. Zeng JL, Cao Z, Yang DW, Xu F, Sun LX, Zhang XF, et al. Effects of MWNTs on phase change enthalpy and thermal conductivity of a solid-liquid organic PCM. J Therm Anal Calorim. 2009;95(2):507–12.

60. Choi DH, Lee J, Hong H, Kang YT. Thermal conductivity and heat transfer performance enhancement of phase change materials (PCM) containing carbon additives for heat storage application. Int J Refrig [Internet]. 2014;42:112–20.

61. Silakhori M, Fauzi H, Mahmoudian MR, Metselaar HSC, Mahlia TMI, Khanlou HM. Preparation and thermal properties of form-stable phase change materials composed of palmitic acid/polypyrrole/graphene nanoplatelets. Energy Build [Internet]. 2015;99:189–95.

62. Lin SC, Al-Kayiem HH. Evaluation of copper nanoparticles - Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. Sol Energy [Internet]. 2016;132:267–78.

63. Ezhumalai DS, Sriharan G, Harikrishnan S. Improved Thermal Energy Storage Behavior of CuO/Palmitic acid Composite as Phase Change Material. Mater Today Proc [Internet]. 2018;5(6):14618–27.

64. Águila V B, Vasco DA, Galvez P P, Zapata PA. Effect of temperature and CuO-nanoparticle concentration on the thermal conductivity and viscosity of an organic phase-change material. Int J Heat Mass Transf. 2018;120:1009–19.

65. Kazemi M, Kianifar A, Niazmand H. Nanoparticle loading effect on the performance of the paraffin thermal energy storage material for building applications. J Therm Anal Calorim [Internet]. 2020;139(6):3769–75.

66. Harikrishnan S, Devaraju A, Sivasamy P, Kalaiselvam S. Experimental investigation of improved thermal Characteristics of SiO2/ myristic acid nanofluid as phase change material (PCM). Mater Today Proc [Internet]. 2019;9:397–409.

67. Sivashankar M, Selvam C, Manikandan S, Harish S. Performance improvement in concentrated photovoltaics using nano-enhanced phase change material with graphene nanoplatelets. Energy [Internet]. 2020;208:118408.

68. Zou D, Ma X, Liu X, Zheng P, Hu Y. Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery. Int J Heat Mass Transf [Internet]. 2018;120:33–41.

69. Wen D, Lin G, Vafaei S, Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology. 2009;7(2):141–50.

70. Yu W, Xie H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. J Nanomater. 2012;2012.

71. Chen L, Xie H, Li Y, Yu W. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. Thermochim Acta. 2008;477(1–2):21–4.

72. Haghighi A, Babapoor A, Azizi M, Javanshir Z. Optimization of the thermal performance of PCM nanocomposites. Res Artic J Energy Manag Technol [Internet]. 2020;4(2):14–9.

73. Bahari M, Najafi B, Babapoor A. Evaluation of α-AL2O3-PW nanocomposites for thermal energy storage in the agro-products solar dryer. J Energy Storage. 2020;28(October 2019).

74. Zhang G, Yu Z, Cui G, Dou B, Lu W, Yan X. Fabrication of a novel nano phase change material emulsion with low supercooling and enhanced thermal conductivity. Renew Energy [Internet]. 2020;151:542–50.

75. Prabhu B, ValanArasu A. Stability analysis of TiO2–Ag nanocomposite particles dispersed paraffin wax as energy storage material for solar thermal systems. Renew Energy [Internet]. 2020;152:358–67.

76. Faraji H, Benkaddour A, Oudaoui K, El

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

Alami M, Faraji M. Emerging applications of phase change materials: A concise review of recent advances. Heat Transf. 2021;50(2):1443–93.

77. Bashar M, Siddiqui K. Experimental investigation of transient melting and heat transfer behavior of nanoparticle-enriched PCM in a rectangular enclosure. J Energy Storage [Internet]. 2018;18(June):485–97.

78. Tiwari S, Rathore PKS. Performance enhancement of solar still for water desalination integrated with thermal energy storage. Mater Today Proc [Internet]. 2021;74:202–6.

79. Qiu L, Ouyang Y, Feng Y, Zhang X. Review on micro/nano phase change materials for solar thermal applications. Renew Energy [Internet]. 2019;140:513–38.

80. Kabeel AE, Abdelgaied M, Harby K, Eisa A. Augmentation of diurnal and nocturnal distillate of modified tubular solar still having copper tubes filled with PCM in the basin. J Energy Storage [Internet]. 2020;32(August):101992.

81. Manoj Kumar P, Saravanakumar PT, Sarojwal A, Saminathan R, Harikrishna D, Jeevan Prasanth S, et al. Experimental investigations on the performance of a single slope solar still with thermal energy storage. Mater Today Proc [Internet]. 2022;

82. Kibria G, Paul UK, Mohtasim S, Das BK, Mustafi NN. Characterization, optimization, and performance evaluation of PCM with Al2 O3 and ZnO hybrid nanoparticles for photovoltaic thermal energy storage. 2024;(December 2023).

83. Bhutto YA, Pandey AK, Saidur R, Rathore PKS, Samykano M. Hybrid silver-graphene nanoparticles enhanced Lauric Acid phase change material for photovoltaic and thermoelectric generator applications: Experimental and simulation analysis. J Energy Storage. 2024;93(5).

84. Wu W, Li W, Han H, Xu M, Lu E, Wang Z, et al. Advanced thermal energy storage made of a ternary CPCM with two phase change temperatures in building walls. Energy Build [Internet]. 2024;318(April):114445.

85. Arshad A, Jabbal M, Yan Y. Preparation and characteristics evaluation of mono and hybrid nano-enhanced phase change materials (NePCMs) for thermal management of microelectronics. Energy Convers Manag [Internet]. 2020;205(December 2019):112444.

grated with copper foam based heat sinks for electronic components thermal cooling. Int Commun Heat Mass Transf. 2018;98:155–62.

87. Warzoha RJ, Fleischer AS. Improved heat recovery from paraffin-based phase change materials due to the presence of percolating graphene networks. Int J Heat Mass Transf [Internet]. 2014;79:314–23.

88.Nitsas M, Koronaki I.P, Laboratory. Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM: An experimental approach. Therm Sci Eng Prog. 2021;25(100963).

89. Li D, Wu Y, Liu C, Zhang G, Arıcı M. Energy investigation of glazed windows containing Nano-PCM in different seasons. Energy Convers Manag. 2018;172(April):119–28.

90. Abdelrazik AS, Al-Sulaiman FA, Saidur R. Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems. Energy Convers Manag [Internet]. 2020;205(August 2019):112449.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]