



## Investigation of Some Important Thermal Properties of Phase Change Materials Upgraded with Nanomaterials

Mostafa Jafarian<sup>1\*</sup>, Masoud Ghazipour Shirvan<sup>2</sup>, Mahdi Babaeian<sup>3</sup>, Mostafa Izadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>PhD Student, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Crop Production, Faculty of Shirvan's Agriculture, University of Bojnord, Bojnord, Iran.

<sup>4</sup>PhD, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 11.04.2021

**Revised:** 01.25.2022

**Accepted:** 02.20.2022

**Keyword:**

Renewable energies

Phase change materials

Melting enthalpy

Thermal diffusivity coefficient

Nanotechnology

**\*Corresponding Author:**

Mostafa Jafarian

**Email:**

[m.jafarian@ut.ac.ir](mailto:m.jafarian@ut.ac.ir)

### ABSTRACT

One of the most practical methods for thermal energy storage is the use of phase change materials (PCMs). In this study, the effect of nanomaterial loading on some important thermophysical properties of PCMs including melting enthalpy and thermal diffusivity coefficient was investigated. Silica (SiO<sub>2</sub>) and copper oxide nanoparticles (CuO) were incorporated into Paraffin wax as a PCM to enhance its thermal properties. To produce the samples, the most accurate methods were used and their morphology was studied by field emission scanning electron microscopy (FESEM). Melting enthalpy and thermal diffusivity were measured by a differential scanning calorimeter (DSC) and a laser flash apparatus (LFA), respectively. The experiments were performed in a factorial arrangement in a completely randomized design with three main factors including the weight percentage of nanoparticles (three levels), the type of nanoparticle (two levels), and the size of the nanoparticles (three levels), and pure Paraffin wax as a control sample with three replications. The results showed that the melting enthalpy of the nanocomposite decreased with the increasing weight percentage of nanoparticles while the size of the nanoparticles displayed no significant effect. In addition, the size and type of nanoparticles affected thermal diffusivity coefficient of Ne-PCMs significantly ( $p < 0.01$ ). Since the enhancement of thermophysical properties of the nanocomposites containing silica nanoparticles was better than copper oxide, it can be concluded that this nanoparticle is more effective in improving the thermal energy storage properties of PCMs.





## بررسی بعضی خواص مهم حرارتی مواد تغییر فاز دهنده ارتقا داده شده با مواد نانو ساختار

مصطفی جعفریان<sup>۱\*</sup>، مسعود قاضی پور شیروان<sup>۲</sup>، مهدی بابائیان<sup>۳</sup>، مصطفی ایزدی<sup>۴</sup>

- ۱- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.
- ۴- دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) است. در این پژوهش، تأثیر افزودن مواد نانو ساختار بر برخی خواص مهم ترموفیزیکی PCMs شامل آنتالپی ذوب و ضریب نفوذ حرارتی بررسی شده است. برای این منظور از پارافین به‌عنوان PCM و از نانوذرات سیلیکا و اکسیدمس، با هدف ارتقای خواص حرارتی آن استفاده گردید. برای تولید نمونه‌ها، دقیق‌ترین روش‌ها به‌کار گرفته شد و آنالیز ریزساختارشناسی آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) انجام شد. آنتالپی ذوب با استفاده از دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) و ضریب نفوذ حرارتی با استفاده از دستگاه فلاش لیزر (LFA) اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌ها با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه عامل اصلی درصد وزنی نانوذره (در ۳ سطح)، نوع نانوذره (در ۲ سطح) و اندازه قطر متوسط نانوذره (در ۳ سطح) و نیز پارافین خالص به‌عنوان نمونه شاهد، با ۳ تکرار انجام شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش آنتالپی ذوب نانوکامپوزیت با افزایش درصد وزنی نانوذره است، درحالی‌که اندازه نانوذره، تأثیر معناداری بر آن ندارد. همچنین تأثیر عوامل اندازه و نوع نانوذره در سطح ۱ درصد بر ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCMs معنی‌دار شده است. از آنجا که پارافین، ماهیت غیرقطبی دارد، نانوذره سیلیکا با آن واکنش بهتری داده است و خواص ترموفیزیکی نانوکامپوزیت ارتقا داده شده با نانوذره سیلیکا، به‌مراتب بهتر از اکسیدمس مشاهده شده است؛ می‌توان نتیجه گرفت که این نانوذره برای بهبود خواص ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در PCMs مؤثرتر است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

### کلید واژگان:

آنتالپی ذوب  
انرژی‌های تجدیدپذیر  
ضریب نفوذ حرارتی  
مواد تغییر فاز دهنده  
نانوفناوری

\*نویسنده مسئول: مصطفی جعفریان  
پست الکترونیکی:  
[m.jafarian@ut.ac.ir](mailto:m.jafarian@ut.ac.ir)



## مقدمه

به علت آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و نیز محدودیت پایان‌پذیری آن‌ها، استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی گرمایی خورشید در سراسر جهان بیش‌ازپیش مورد توجه و بهره‌برداری قرار گرفته است اما به علت ماهیت متغیر و متناوب انرژی خورشیدی، بهره‌برداری بهینه از آن نیازمند روشی مناسب، با هدف ذخیره‌سازی برای طول شب و نیز ساعات بارانی و ابری است. در میان روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، ذخیره انرژی به شکل نهان به دلیل چگالی بالای ذخیره انرژی و مشخصه‌های منحصربه‌فرد آن در ذخیره گرما در دمای ثابت هنگام تغییر فاز، روشی قابل‌قبول‌تر می‌باشد. نحوه عملکرد این مواد به این صورت است که با افزایش دمای آن‌ها تا نقطه ذوب با تغییر فاز از حالت جامد به مایع، انرژی حرارتی را در خود ذخیره می‌کنند و با کاهش دمای آن‌ها تا نقطه انجماد با تغییر فاز از حالت مایع به جامد انرژی حرارتی ذخیره‌شده را آزاد می‌کنند.

در کاربردهای صنعتی از این پدیده، برخی از مواد به علت دارا بودن گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم کم در هنگام تغییر فاز، در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده می‌شوند. این مواد با عنوان کلی مواد تغییر فازدهنده (PCM) شناخته می‌شوند. امروزه استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCMs) در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای رفع مشکل مذکور مورد تحقیق محققان واقع شده است [۱]. با این وجود مواد تغییر فازدهنده، به خودی خود بازده پایینی دارند که این مسئله محققان را بر آن داشته است تا راه‌حل‌های مختلفی را برای ارتقای خواص حرارتی مواد تغییر فازدهنده به کار گیرند. در پژوهش‌های جدید، افزودن نانوذرات به مواد تغییر فازدهنده برای بهبود خواص حرارتی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۲-۵]. دانستن خواص حرارتی مواد تغییر فازدهنده پرکاربرد، برای ارتقای بازده حرارتی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برای طراحان و بهره‌برداران برخوردار است.

دو عامل آنتالپی ذوب و ضریب نفوذ حرارتی، از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملکرد بهینه مواد تغییر فاز دهنده هستند. آنتالپی ذوب در واقع تعیین‌کننده چگالی انرژی حرارتی ذخیره شده در ماده است و ضریب نفوذ حرارتی، معیاری از توانایی ماده در رسانش گرما در قیاس با ذخیره انرژی گرمایی در آن ماده است. این کمیت به صورت نسبت گرمای عبور کرده به گرمای ذخیره شده توسط واحد حجم ماده شناخته می‌شود [۶]. بنابراین هنگام آماده‌سازی مواد تغییر فازدهنده ارتقا داده شده با مواد نانو ساختار، توجه به این دو عامل، اهمیتی دوچندان می‌یابد؛ علم به این عوامل و اقدام در راستای بهبود آن‌ها، در افزایش بازده سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کمک شایانی می‌کند؛ لذا درصد وزنی مواد نانو ساختار افزوده شده و اندازه آن باید در یک محدوده مناسب باشد، به دلیل اینکه کمی یا فزونی بیش از حد آن، منجر به پایین آمدن بازدهی سامانه و در نهایت اتلاف هزینه خواهد شد.

در این زمینه محققان تحقیقات مختلفی انجام داده‌اند؛ از جمله در پژوهشی، محققان با استفاده از متیل استئارات و اکسیدگرافن ماده تغییر فاز دهنده ساختند. این محققان نتیجه گرفتند که با افزودن ۱۰ درصد وزنی از نانوذره اکسیدگرافن، ۱۳/۵ درصد کاهش آنتالپی ذوب مشاهده شده است [۷]. پژوهشگران دیگری در تحقیقی ۱ درصد وزنی نانوذره سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) را در کربنات لیتیم و کربنات پتاسیم آمیختند و ضریب نفوذ حرارتی آن دو را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها به ترتیب افزایش ۲۵ درصد و ۲۸ درصد را گزارش کردند [۸]. پژوهشگران دیگری در پژوهشی تأثیر نانوذره اکسیدمس ( $\text{CuO}$ ) را بر مواد تغییر فاز دهنده نیترات پتاسیم و نیترات سدیم سنجیدند. این محققان افزایش مقدار ضریب نفوذ حرارتی را در مواد تغییر فازدهنده مورد آزمایش‌شان با افزایش غلظت مواد نانو ساختار افزوده شده، گزارش کردند [۹]. در تحقیقی دیگر خواص ترموفیزیکی پالمیتیک اسید که در آن دی‌اکسیدتیتانیوم آمیخته شده بود سنجیده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ۵ درصد وزنی نانوذره، آنتالپی ذوب به مقدار  $180/03 \text{ kJ/kg}$  کاهش می‌یابد که این میزان در مقایسه با مقدار پالمیتیک اسید خالص  $15/6$  درصد کاهش را نشان می‌دهد [۱۰]. در پژوهش دیگری مواد

تغییرفازدهنده، حاوی مواد نانو ساختار برای ارتقای ذخیره سازی انرژی حرارتی و کاربردهای سرمایه‌های غیرفعال آزمون شدند. در این پژوهش امکان استفاده از نانوذره‌های اکسید آلومینیوم و کربن برای ارتقای ویژگی‌های حرارتی پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده بررسی شدند. این ویژگی‌های حرارتی شامل هدایت حرارتی، گرمای ویژه و گرمای نهان بودند. نتیجه گیری این تحقیق این بود که مواد تغییرفازدهنده نانو ساختار، یک راه حل عملی و مفید برای کاهش یا حذف محدودیت‌های ذاتی مواد تغییرفازدهنده از جمله پارافین است [۱۱]. در تحقیقی دیگر برای PCM ارتقا داده شده با مواد نانو ساختار، سه ویژگی گرمای نهان، نقطه ذوب و ضریب هدایت حرارتی سنجیده شد. نتیجه این تحقیق این بود که با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافیت، ذخیره سازی انرژی حرارتی بهتر صورت می‌گیرد [۱۲]. در پژوهش دیگری، ویژگی‌های حرارتی - شیمیایی ماده تغییرفازدهنده نئوپنتیل گلیکول حاوی نسبت‌های وزنی مختلف ماده نانو ساختار CuO اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت وزنی نانوذره از ۰/۵ تا ۳ درصد در آنتالپی ذوب کاهشی به میزان ۳/۱ تا ۹/۶ درصد رخ می‌دهد [۱۳]. در پژوهشی دیگر با افزودن نسبت‌های وزنی مختلف از نانوذره اکسید مس (CuO) به پارافین، بعضی از خواص حرارتی آن به عنوان ماده تغییرفازدهنده سنجیده شد. در این پژوهش این نتیجه حاصل شد که با افزودن ۱ درصد و ۵ درصد از نانوذره مذکور به پارافین، در آنتالپی ذوب آن به ترتیب ۸/۰۱ درصد و ۳۲/۱۴ درصد کاهش رخ داده است [۱۴]. محققان دیگری تأثیر افزودن نانوگالیم را در دو نسبت وزنی ۱ درصد و ۵ درصد بر ذخیره سازی انرژی ارگانومتالیک منگنز سنجیدند. در این تحقیق، محققان دمای تغییر فاز و گرمای نهان PCM را اندازه گرفتند و از ابزارهایی همچون FTIR, SEM, FESEM و DSC بهره جستند. در نتایج این تحقیق آمده است بیشترین افزایش در آنتالپی، در نسبت وزنی ۵ درصد از نانوذره به مقدار ۱۳/۵ درصد ایجاد شده است [۱۵]. در تحقیق دیگری تأثیر افزودن نانوذره اکسید مس بر میزان تغییرات آنتالپی ذوب ماده تغییرفازدهنده حاوی مواد نانو ساختار بررسی گردید و نتایج نشان داد با افزایش ۱۹/۷۲ درصد نانوذره مذکور، آنتالپی ذوب به میزان ۵۱/۵ درصد کاهش می‌یابد [۱۶]. در پژوهشی پارافین و اکس با درصد‌های وزنی مختلف از نانوذرات نیکل مس آمیخته شد و در یک مبدل حرارتی، عملکرد آن بررسی شد. نتایج شبیه سازی با نرم افزار کامسول (COMSOL) نشان داد نانوذرات آمیخته شده، در بهترین حالت نفوذ حرارتی را تا ۳۴/۵ درصد افزایش می‌دهد [۱۶]. تحقیقاتی در خصوص تعیین خواص ترموفیزیکی در مواد تغییر فازدهنده ارتقا داده شده با نانوذرات از قبیل نانوذره گرافن در استریک اسید [۱۷]، نانوفیبر گرافیتی در پارافین [۱۸]، نانوذره Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> در پارافین [۱۹] نیز صورت گرفته است. تحقیقات انجام شده در این زمینه، مبین این مطلب است که نانوذرات، نقش مهمی در فعل و انفعالات منجر به بهبود خواص حرارتی، ترموفیزیکی و انتقال حرارت نانوسیالات و مواد تغییر فازدهنده مورد استفاده دارند.

در تحقیق حاضر، تأثیر استفاده از دو نوع ماده نانو ساختار بر روی دو خاصیت مهم حرارتی مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## روش شناسی

از آن جا که در این تحقیق می‌خواهیم تأثیر سه متغیر را بررسی کنیم، بهترین انتخاب آزمون فاکتوریل است [۲۰]؛ از این رو آزمایش‌ها با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. متغیرهای مستقل شامل نوع نانوذره (در ۲ سطح)، اندازه نانوذره (در ۳ سطح) و درصد وزنی نانوذره (در ۳ سطح) و متغیرهای وابسته نیز شامل ضریب نفوذ حرارتی و آنتالپی ذوب بودند. محققان از اندازه‌ها و درصد وزنی‌های گوناگون مواد نانو ساختار برای ارتقای خواص حرارتی PCM بهره گرفته‌اند [۲۱؛ ۲۲]. برای پوشش دامنه وسیعی از اندازه و درصد وزنی نانوذرات، در این تحقیق نانوذره سیلیکا و نانوذره اکسید مس در پارافین مذاب با درصد‌های وزنی ۰، ۲، ۵ و ۸ درصد و سه اندازه نانوذره با اقطار متوسط ۰، ۳، ۷۰ و ۱۱۰ نانومتر آمیخته گردیدند. در مجموع با در نظر گرفتن نمونه شاهد، ۱۹ نمونه با حداقل ۳ تکرار بررسی شد.

خلاصه مشخصات نمونه‌های مورد ارزیابی در این تحقیق به همراه کد اختصاصی در نظر گرفته شده برای هر نمونه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش

اندازه (nm)	نسبت وزنی (%)	نانوذره	نام نمونه	اندازه (nm)	نسبت وزنی (%)	نانوذره	نام نمونه
۳۰	٪۲	SiO <sub>2</sub>	S2S	۳۰	٪۲	CuO	C2S
۷۰	٪۲	SiO <sub>2</sub>	S2M	۷۰	٪۲	CuO	C2M
۱۱۰	٪۲	SiO <sub>2</sub>	S2B	۱۱۰	٪۲	CuO	C2B
۳۰	٪۵	SiO <sub>2</sub>	S5S	۳۰	٪۵	CuO	C5S
۷۰	٪۵	SiO <sub>2</sub>	S5M	۷۰	٪۵	CuO	C5M
۱۱۰	٪۵	SiO <sub>2</sub>	S5B	۱۱۰	٪۵	CuO	C5B
۳۰	٪۸	SiO <sub>2</sub>	S8S	۳۰	٪۸	CuO	C8S
۷۰	٪۸	SiO <sub>2</sub>	S8M	۷۰	٪۸	CuO	C8M
۱۱۰	٪۸	SiO <sub>2</sub>	S8B	۱۱۰	٪۸	CuO	C8B

## روش انجام آزمایش

### انتخاب ماده تغییر فاز دهنده

پارافین‌ها با فرمول مولکولی عمومی  $C_nH_{2n+2}$  از جمله معمول‌ترین مواد ذخیره‌کننده انرژی حرارتی برای کاربردهای تجاری هستند [۲۳]. خواص اصلی پارافین‌ها غیر خورندگی، قابلیت ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی گرمایی، نقطه ذوب متناسب با کاربردهای صنعتی و ارزان و در دسترس بودن است؛ پارافین‌ها به علت ویژگی ذاتی که دارند، در یک محدوده دمایی وسیع، به‌عنوان ماده ذخیره‌کننده گرما قابل استفاده‌اند [۲۴]. علی‌رغم ویژگی‌های مزبور، پارافین‌ها فاقد برخی خواص حرارتی مطلوب از جمله ضریب نفوذ حرارتی بالا هستند. پارافین مورد استفاده در این پژوهش دارای نقطه ریزش  $60^\circ C$ ، درصد روغن ۱٪-۵٪، درجه اشتعال  $220^\circ C$  و چگالی آن در حالت جامد و مایع به ترتیب  $900 \text{ kg/m}^3$  و  $900 \text{ kg/m}^3$  است.

### انتخاب مواد نانو ساختار

در این تحقیق، از دو نانوذره اکسیدمس و سیلیکا استفاده شده است. این مواد نانو ساختار شناسنامه‌دار ساخت شرکت تحقیقات نانومواد کشور آمریکا<sup>۱</sup> بودند.

نانوذره سیلیکا به لحاظ ظاهری پودری سفید رنگ است و دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی از قبیل زیست‌سازگاری بالا، سمیت پایین، سهولت سنتز، ثبات و پایداری بالا، اصطکاک بسیار کم، ساختار چندمنظوره و تطبیق‌پذیر و استحکام خوب است [۲۵]. رنگ نانوذره اکسیدمس قهوه‌ای مایل به سیاه است و دارای خصوصیات مطلوبی مثل رسانایی بالا، انعطاف‌پذیری زیاد، استحکام خوب، خواص کاتالیزوری و الکتریکی مناسب است. این نانوذره با سطح ویژه و تخلخل زیاد، زمانی که به‌عنوان عامل در ترکیبات آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، قادر به دستیابی به عملکرد واکنش بالاتر و زمان واکنش کوتاه‌تر است [۲۶]. از آنجا که نانوذره اکسیدمس نسبت به سایر نانوذرات اکسید فلزی، ضریب انتقال حرارت

<sup>1</sup> US Research Nanomaterials, Inc.

بالا تری دارد [۲۷] و نانوذره سیلیکا ظرفیت بسیار خوبی برای بهبود خواص حرارتی دارد و نیز قیمت آن نسبت به سایر نانوذرات ارتقادهنده خواص حرارتی PCMها پایین تر است [۲۸]؛ این دو نانوذره برای ارتقای خواص حرارتی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده انتخاب شده اند.

## آماده سازی نمونه ها

### پایدار کننده<sup>۱</sup>

وجود تعاملات قوی و اندروالس بین نانوذرات که معمولاً به تشکیل تجمعی از نانوذرات یا کلوخه شدن منجر می شود یکی از مهم ترین مشکلات تهیه یک نانوکامپوزیت همگن است. با افزودن پایدار کننده ها، سازگاری بهتری در ماتریس حاصل می شود و برهم کنش نانوذرات با پارافین بهبود می یابد و از ته نشینی نانوذرات در ماتریس در هنگام تغییر فاز ممانعت به عمل می آید. امروزه بیشتر محققان از فعال کننده سطحی برای پایداری نانوذرات در ماده پایه استفاده می کنند. در این پژوهش از سازگار کننده اسیداولئیک به مقدار ۱ درصد وزنی برای هر نمونه استفاده گردید [۲۹].

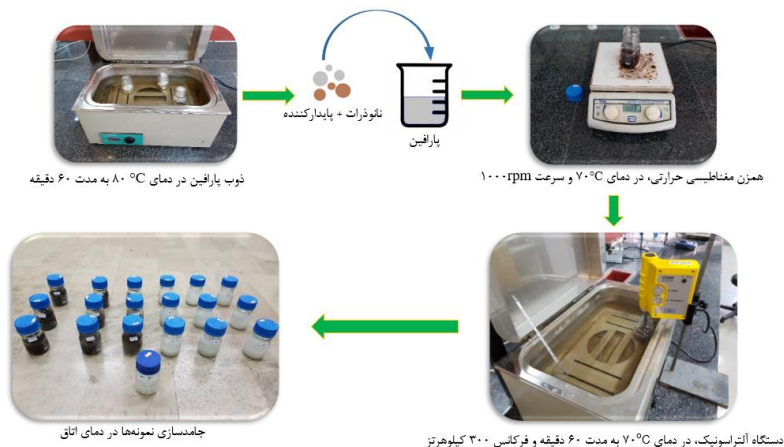
### نحوه ساخت مواد تغییر فاز دهنده توأم با مواد نانوساختار

در پژوهش حاضر ابتدا قطعاتی از پارافین با ترازوی دیجیتال مدل 2200C ساخت شرکت Precisa با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده و نمونه های پارافین با وزن ۵۰ گرم آماده شدند. برای اطمینان کامل از پایداری محصول نهایی و نیز جلوگیری از ترکیب آن با هوا، محفظه های اتوکلاو پیرکس از جنس بوروسیلیکات<sup>۲</sup> با قابلیت تحمل دماهای بالا انتخاب گردیدند و نمونه های پارافین وارد آن ها شدند. سپس مطابق شکل ۱، محفظه ها در حمام آب با دمای ۸۰°C به مدت یک ساعت قرار داده شدند [۳۰]. نانوذرات تهیه شده نیز با ترازوی دیجیتال مدل BP121S ساخت شرکت Sartorius با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شد و مطابق مقادیر تعریف شده در جدول ۱، به محفظه ها افزوده شدند [۳۱]. از آن جایی که به اذعان محققان این علم، تماس مواد نانوساختار با بدن و یا تنفس بخارات آن برای سلامتی به شدت خطرناک است [۳۲]، کلیه عملیات توزین و پراکنش نانوذرات در PCM، زیر هود آزمایشگاه و در شرایط کاملاً کنترل شده انجام گرفت. در این مرحله ۱ درصد وزنی اسیداولئیک به عنوان پایدار کننده به نمونه ها افزوده شد و پس از آن محفظه ها روی دستگاه همزن مغناطیسی حرارتی مدل DX300 ساخت شرکت Techne قرار گرفتند و در دمای ۷۰°C با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۶۰ دقیقه مخلوط شدند [۱۸]. سپس مطابق شکل ۱، نمونه ها با استفاده از دستگاه آلتراسونیک مدل UP100H ساخت شرکت Hielscher، به مدت ۶۰ دقیقه و با توان ۱۰۰ وات و فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز و در دمای ۷۰°C تحت تأثیر قرار داده شدند [۱۱]. روش آلتراسونیک، به علت تماس مستقیم پروب با سیال، توزیع یکنواخت تری را ایجاد می کند [۳۰]. بعد از آن، محفظه ها در دمای آزمایشگاه، قرار داده شدند تا جامد شده و برای اجرای آزمایش ها آماده شوند. این نمونه ها با عنوان مواد تغییر فاز دهنده ارتقا داده شده با مواد نانوساختار (Ne-PCMs<sup>3</sup>) شناخته می شود.

<sup>1</sup> Surfactant

<sup>2</sup> Brosilicate

<sup>3</sup> Nanostructure-enhanced PCMs



شکل ۱. مراحل آماده‌سازی NePCMs

### میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)

این میکروسکوپ الکترونی که از دقیق‌ترین روش‌های ریزساختارشناسی به‌شمار می‌رود، در واقع نوعی SEM است که دارای تفنگ الکترونی انتشار میدانی است. تفنگ الکترونی نشر میدانی (Field Emission)، به انرژی حرارتی برای غلبه بر پتانسیل سطحی نیازی ندارد و با اعمال میدان الکتریکی بسیار بالا به سطح نمونه و با بمباران کردن سطح نمونه، الکترون‌ها را از سطح نمونه جدا می‌کند و ساختار تشکیل‌دهنده نمونه را مطالعه و بررسی می‌کند [۳۳]. این میکروسکوپ بهترین انتخاب برای ریزساختارشناسی نمونه‌های بیولوژیکی و نیز نمونه‌های دارای چرب‌ناکی از جمله پارافین است. در این تحقیق عکس برداری‌ها با استفاده از دستگاه FESEM مدل BRNO-Mira3-FEG ساخت شرکت TESCAN با وضوح یک نانومتری و بزرگ‌نمایی حدود یک میلیون برابر و با اعمال ولتاژ ۳۰ kv انجام گرفت.

### نحوه اندازه‌گیری مقادیر آنتالپی ذوب

اندازه‌گیری مقادیر آنتالپی ذوب Ne-PCMs در آزمایشگاه I3A<sup>۱</sup> وابسته به دولت ایالت آراگون واقع در گروه مهندسی حرارتی و سامانه‌های انرژی (GITSE<sup>۲</sup>) دانشکده مهندسی دانشگاه ساراگوسا کشور اسپانیا صورت پذیرفت. کلیه فعالیت‌های پژوهشی I3A، زیر نظر آژانس بین‌المللی انرژی (IEA<sup>۳</sup>) انجام می‌گیرد. این اندازه‌گیری توسط دستگاه DSC Maria F3 ساخت شرکت Netzsch کشور آلمان انجام شد. این دستگاه دو محل برای قرارگیری نمونه موردسنجش و شاهد دارد و اختلاف انرژی حرارتی که به نمونه و شاهد داده می‌شود را به‌صورت تابعی از دما ثبت می‌کند. در واقع محل قرارگیری نمونه و شاهد به صورت مجزا طی یک برنامه کنترل شده، توسط گرم‌کن‌های جداگانه طوری گرما دریافت می‌کنند که درجه حرارت هر دو همیشه یکسان باشد. محل قرارگیری نمونه و شاهد حکم کوره را دارد و توسط سه محفظه بزرگ‌تر محاط شده‌اند تا هوابندی و عایق‌بندی کامل کوره‌ها حفظ شود. در هر لحظه، دمای نمونه و شاهد واقع در کوره‌ها توسط دماسنج‌های مقاوم پلاتینی پیمایش می‌شود و اختلاف درجه حرارت آن دو توسط دو مدار کنترل درجه

<sup>1</sup> Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (In Spanish)

<sup>2</sup> Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos (In Spanish)

<sup>3</sup> International Energy Agency

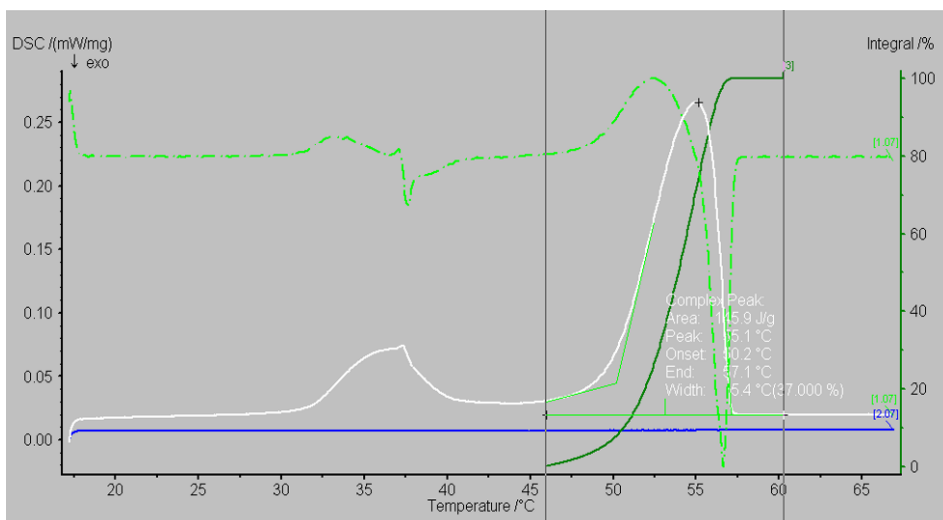
حرارت، محاسبه می‌شود. مدارهای کنترل، درجه حرارت متوسط نگهدارنده‌های نمونه و شاهد را تبدیل به سیگنال الکترونیکی می‌کند و طی یک برنامه زمان‌بندی مشخص به کامپیوتر دستگاه ارسال می‌کند. این دو سیگنال توسط نرم‌افزار دستگاه با یکدیگر مقایسه می‌شود. در نهایت اختلاف موجود بین این دو سیگنال به دستگاه ارسال می‌شود و انرژی حرارتی ورودی به نمونه و شاهد تنظیم می‌گردد؛ به طوری که اختلاف دمای آن دو کمینه شود. در واقع خروجی این دستگاه، سیگنال الکترونیکی است که متناسب با اختلاف انرژی حرارتی داده شده بین دو کوره نمونه و شاهد است. به منظور جلوگیری از اکسایش، محیط داخلی کوره‌ها به گاز نیتروژن دستگاه متصل است. به توصیه کارخانه سازنده از ماده یاقوت کبود<sup>۱</sup> به‌عنوان ماده شاهد که به‌صورت نمونه‌های استاندارد توسط شرکت سازنده دستگاه ارائه شده است، استفاده شد.

از آنجا که ضریب هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده ذاتاً پایین است، اگر در فرایند گرمادهی به نمونه، نرخ گرمایش را بالا در نظر بگیریم، فرصت تبادل دمایی بین منبع حرارتی و نمونه ایجاد نمی‌شود و اگر نرخ گرمایش را خیلی پایین در نظر بگیریم، سیگنال ضعیفی ایجاد می‌شود و دقت کار پایین می‌آید؛ از این رو برای انتخاب نرخ مناسب گرمایش و سرمایش باید عملیات تعادل حرارتی<sup>۲</sup> را انجام دهیم. منظور از تعادل حرارتی این است که باید با نرخ‌های مختلف گرمایش و سرمایش، چندین فرایند را اجرا کنیم و با توجه به نمودارهای خروجی، بهترین نرخ گرمایش و سرمایش را انتخاب کنیم. نرخ‌های گرمادهی که در عملیات تعادل حرارتی اجرا گردید، از بیشترین به کمترین عبارت بودند از: ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ (K/min). فرایند اجرا شده به‌ازای هر سرعت به این قرار است: نمونه با سرعت انتخابی از دمای محیط به دمای ۱۰°C رسانده شد و ۵ دقیقه در این دما نگه داشته شد، سپس به دمای ۶۸°C رسانده شد و ۵ دقیقه در این دما نگهداری گردید و دوباره به دمای ۱۰°C برگردانده شد و ۵ دقیقه در این دما باقی گذارده شد و همین مراحل برای سرعت بعدی انجام گرفت. انجام این فرایند ۲۱ ساعت زمان برد و شامل فرایندهای هم‌دما، گرمایش و سرمایش فعال بود. در نهایت پس از مقایسه نمودارهای ایجاد شده، در نرخ گرمادهی ۰/۵ K/min کمترین میزان خمیدگی در نمودار آنتالپی- دما پدید آمد. سپس یک بار دیگر با همان نرخ گرمادهی، فرایند اجرا شد تا اطمینان حاصل شود که دقیقاً همان قله‌هایی که ظاهر شده بود، تکرارپذیر است. پس از حصول این اطمینان، نرخ ۰/۵ K/min به‌عنوان نرخ گرمادهی بهینه انتخاب گردید و آزمایش‌ها با آن انجام شد. اجزای فرایند به این شرح است: ابتدا به مقدار ۱۰ میلی‌گرم از نمونه Ne-PCM وزن شده و داخل بوته قرار داده شد و با درپوش مخصوص پوشانده شد و پرس گردید و وزن آن با ترازوی با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری و یادداشت شد. نمونه‌های آماده شده به همراه نمونه شاهد به ترتیب در کوره دستگاه قرار داده شد و توسط برنامه داده شده به دستگاه، فرایند گرماسنجی روبشی اجرا شد. طبق برنامه تعیین شده، ابتدا نمونه با سرعت ۵ K/min از دمای محیط به دمای ۱۸°C رسانده شد و ۵ دقیقه در این دما نگهداری شد، سپس دو بار با نرخ ۰/۵ K/min به دمای ۶۸°C رسانده شد و مجدداً به دمای ۱۸°C برگردانده گردید؛ دلیل این عمل افزایش دقت برای بررسی دقیق رفتار حرارتی نمونه‌های Ne-PCM است. در واقع مرحله اول گرمادهی برای حصول اطمینان از تماس کامل نمونه با بوته آن است. انجام هر آزمایش بیش از ۷ ساعت زمان می‌برد. این آزمایش برای هر ۱۹ نمونه با سه تکرار انجام شد.

قله اول ایجاد شده در نمودار، برای برقراری تماس خوب بین نمونه و بوته در آزمایش گنجانده شده است؛ از این رو با محدودسازی خروجی نرم‌افزار به قله دوم می‌توان سطح زیر نمودار یا آنتالپی ذوب را برحسب J/g به‌دست آورد. برای نمونه در شکل ۲، خروجی نرم‌افزار محدود شده برای قسمت دوم فرایند آزمایش و برای C8M نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Sapphire

<sup>2</sup> Thermal Equilibrium



شکل ۲. خروجی نرم‌افزار محدود شده برای قسمت دوم فرایند آزمایش

### نحوه اندازه‌گیری ضریب نفوذ حرارتی

ضریب نفوذ حرارتی به صورت نسبت قابلیت مواد در انتقال گرما به قابلیت آن‌ها در ذخیره‌سازی گرما در واحد حجم ماده تعریف می‌شود و طبق رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c_p} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $\alpha$  ضریب نفوذ حرارتی برحسب  $\text{m}^2/\text{s}$ ،  $k$  ضریب هدایت حرارتی برحسب  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ،  $\rho$  چگالی برحسب  $\text{kg}/\text{m}^3$  و  $c_p$  گرمای ویژه برحسب  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$  است [۳۴]. اندازه‌گیری شاخص ضریب نفوذ حرارتی نیز در آزمایشگاه I3A صورت پذیرفت. این سنجش‌ها توسط دستگاه<sup>۱</sup> LFA مدل ۴۵۷ میکروفلش ساخت شرکت Netzsch کشور آلمان انجام شد. نحوه عملکرد این دستگاه به این صورت است که نمونه‌ها به صورت یک دیسک نازک در محل مخصوص قرارگیری نمونه گذاشته می‌شود و در مدت زمان مشخص که از طریق کامپیوتر دستگاه تعریف می‌گردد، توسط اشعه لیزر در معرض پالس انرژی قرار می‌گیرند. این پالس انرژی توسط سطح نمونه جذب می‌شود. با لحاظ کردن ضخامت نمونه و زمان سپری شده برای رسیدن حرارت از یک طرف نمونه به طرف دیگر آن، نفوذ حرارتی توسط دستگاه محاسبه می‌شود. گسیلنده اشعه لیزر دارای طول پالس<sup>۲</sup> ۳۳۰ میکروثانیه و انرژی خروجی ۱۵ J/pulse است. توان موردنیاز لیزر از یک مخزن ذخیره انرژی (خازن) که در یک جعبه مجزا قرار گرفته است، تأمین می‌شود. توان خروجی خازن توسط نرم‌افزار دستگاه و با تغییر سطح ولتاژ خازن کنترل می‌شود. با توجه به ضخامت نمونه، اشعه لیزر توسط یک سامانه نوری توسعه داده شده، تنظیم می‌شود. محفظه قرارگیری نمونه، مجهز به تغییردهنده خودکار مکان نمونه است، لذا سه نمونه را می‌توان هم‌زمان در محفظه قرار داد. محدوده‌ی دمایی دستگاه (۱۱۰۰-۲۵) است. روش اجرای آزمایش براساس

<sup>۱</sup> Laser Flash Apparatus

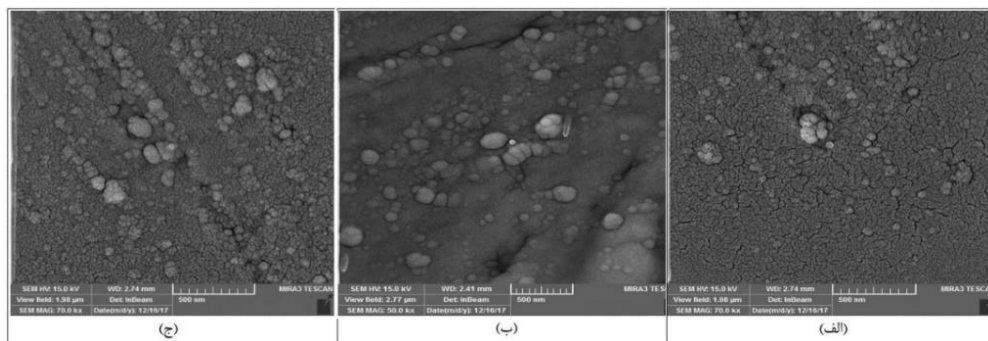
<sup>۲</sup> Pulse length

دستورالعمل تدوین شده توسط مرکز تحقیقات کاربردی انرژی باواریا<sup>۱</sup> در کشور آلمان زیر نظر IEA انجام شد. برای شروع آزمایش، ابتدا این دستگاه در سه مرحله و با نمونه‌های ارائه شده توسط شرکت سازنده و از جنس یاقوت کبود، آلومینیوم و پلاتین واسنجی شدند. سپس با استفاده از ابزار مخصوصی، نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای با قطر ۱۳ میلی‌متر و ارتفاع یک میلی‌متر ساخته شدند. به توصیه‌ی شرکت سازنده‌ی دستگاه، نمونه‌ها با گرافیت پوشش‌دهی شدند و آزمایش‌ها انجام پذیرفت، اما پس از پایان آزمایش‌ها مشخص شد نتایج منطقی نیست، پس از بررسی میکروسکوپی فراوان مشخص گردید که گرافیت به داخل نمونه‌ها نفوذ کرده است. مجدداً نمونه‌ها با همان الگوی قبلی تهیه گردیدند و با فویل آلومینیوم چسبیده به دقت پوشانده شدند و تحت اثر پوشش‌دهی گرافیت قرار گرفتند. ولتاژ گسیلنده لیزر دستگاه روی ۱۵۳۸ ولت تنظیم شد و برای هر نمونه پنج پرتاب<sup>۲</sup> یعنی پنج تکرار صورت گرفت.

## نتایج و بحث

### بررسی نتایج تصاویر FESEM

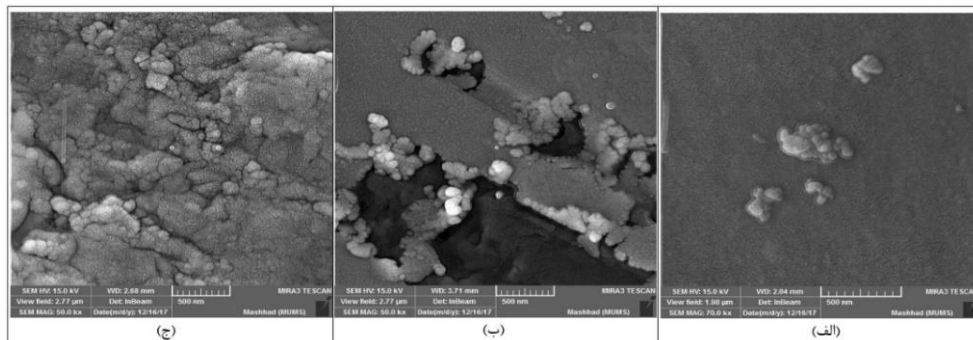
در شکل ۳ و ۴، تصاویر FESEM نمونه‌های Ne-PCM نشان داده شده است. همان‌طور که از این تصاویر برمی‌آید، نمونه‌ها، دارای توزیع منظم و یکنواخت‌اند و از پراکندگی قابل قبول و کلوخگی کم برخوردار هستند. این تصاویر امکان ریخت‌شناسی و نیز مشاهده میانگین اندازه ذرات را به راحتی فراهم می‌سازد.



شکل ۳. تصاویر FESEM، برای نمونه‌های الف (C2M ب) C5M ج) C8M

<sup>1</sup> Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (In German)

<sup>2</sup> Shot



شکل ۴. تصاویر FESEM، برای نمونه‌های الف (S2M ب) S5M ج) S8M

مطابق شکل‌های ۳ و ۴، مشخص است که با افزایش درصد وزنی نانوذره در هر نمونه، پراکنش نانوذرات در Ne-PCM بیشتر شده است؛ در واقع، افزایش درصد وزنی نانوذرات، سبب افزایش ویسکوزیته مخلوط شده و میزان نیروی اعمالی به نانوذرات افزایش یافته است که این موضوع سبب شکستن و کوچک‌تر شدن اندازه کلوخه‌های نانوذرات و توزیع بهتر آن‌ها در پارافین گردیده است [۳۵]. از طرفی ماهیت پارافین غیرقطبی است و سازگار کننده اسید اولئیک، دارای دو بخش قطبی و غیرقطبی است؛ اتفاقی که روی داده است این است که بخش قطبی اسید اولئیک با نانوذرات و بخش غیرقطبی آن با پارافین واکنش بهتری داده است. در واقع سازگار کننده، باعث بهبود پراکنش نانوذرات در ماتریس ترکیب شده و از کلوخه‌شدن آن‌ها جلوگیری کرده است.

### بررسی آنتالپی ذوب

نتایج اندازه‌گیری مقادیر میانگین آنتالپی ذوب Ne-PCMs با تیمارهای موردبررسی، در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار آنتالپی ذوب برای نمونه شاهد که عبارت بود از پارافین خالص بدون هیچ‌گونه افزودنی از نانوذرات،  $160/91 \text{ J/g}$  به‌دست آمده است.

جدول ۱. مقادیر میانگین و انحراف معیار آنتالپی ذوب Ne-PCMs بر حسب J/g

درصد وزنی	اندازه نانوذره (nm)	متغیر	آنتالپی با نانوذره $\text{SiO}_2$	آنتالپی با نانوذره
۲٪	۳۰	میانگین	۱۵۴/۳۰	۱۵۹/۳۳
		انحراف معیار	۳/۶۹	۵/۲۱
	۷۰	میانگین	۱۵۴/۹۲	۱۵۶/۸۲
		انحراف معیار	۵/۱۶	۳/۸۰
۱۱٪	۱۱۰	میانگین	۱۵۲/۳۱	۱۵۵/۵۵
		انحراف معیار	۳/۳۵	۴/۲۳
	۳۰	میانگین	۱۵۱/۸۸	۱۴۴/۳۸
		انحراف معیار	۲/۶۳	۴/۰۲
۷٪	۷۰	میانگین	۱۴۹/۷۹	۱۴۹/۰
		انحراف معیار	۲/۹۱	۴/۰۶

درصد وزنی	اندازه نانوذره (nm)	متغیر	آنتالپی با نانوذره SiO <sub>2</sub>	آنتالپی با نانوذره
۱۱۰	۱۱۰	میانگین	۱۴۸/۵۲	۱۴۷/۶۹
		انحراف معیار	۳/۲۷	۳/۹۰
۳۰	۳۰	میانگین	۱۵۷/۳۹	۱۳۳/۶۹
		انحراف معیار	۲/۸۷	۶/۴۹
۷۰	۷۰	میانگین	۱۵۱/۰۷	۱۴۲/۱۱
		انحراف معیار	۳/۰۱	۷/۲۳
۱۱۰	۱۱۰	میانگین	۱۴۸/۰۵	۱۳۱/۲۵
		انحراف معیار	۳/۷۲	۳/۵۰

با بررسی جدول ۱ به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش درصد وزنی نانوذرات افزوده شده، آنتالپی ذوب، کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان آن به مقدار  $۱۵۹/۳۳ \text{ J/g}$  در نمونه C2S و کمترین میزان آن به مقدار  $۱۳۱/۲۵ \text{ J/g}$  در نمونه C8B ایجاد شده است. برای کمترین میزان آنتالپی ذوب ایجاد شده در Ne-PCM با نانوذرات سیلیکا و اکسیدمس در قیاس با نمونه شاهد، به ترتیب ۸/۷ درصد و ۲۲/۶ درصد کاهش رخ داده است. دلیل فیزیکی این پدیده این است که در فرایند تغییر فاز، نانوذرات مشابه پارافین، تغییر فاز نمی‌دهند؛ از این رو هرچه درصد وزنی آن‌ها بیشتر باشد، آنتالپی ذوب Ne-PCM کمتر است [۶]. همچنین با بررسی جدول ۱ به این نتیجه می‌رسیم که روند منطقی قابل توجهی در تغییرات مقدار آنتالپی ذوب با عامل اندازه نانوذره مشاهده نمی‌شود. برخی از تحقیقات گذشته نیز روندی در تغییرات آنتالپی ذوب PCM و نانوسیالات متناسب با اندازه نانوذره نیافتند. برای مثال، در تحقیقی که بر روی نمک اوتکتیک انجام شده است تأثیر سه اندازه از نانوذره سیلیکا که عبارت بودند از: ۵، ۱۰ و ۳۰ نانومتر را بر آنتالپی آن آزموده شد. محققان این تحقیق نیز تغییرات معناداری در این رابطه نیافتند [۳۶]. همچنین در تحقیقی در همین زمینه، چهار اندازه اکسیدسیلیکون شامل ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ نانومتر در کربنات‌لیتیم به‌عنوان PCM آمیخته شدند، نتیجه حاصل افزایش آنتالپی ذوب با قطع نظر از اندازه نانوذره بود [۳۷]. مقدار آنتالپی ذوب، پارامتر مؤثری در عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است. در واقع این عامل، تعیین‌کننده مقدار چگالی انرژی حرارتی است؛ لذا هرچه مقدار آن بیشتر باشد، عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. از بررسی دقیق نتایج حاصل از میانگین آنتالپی ذوب Ne-PCM در سطوح مختلف می‌توان مشاهده کرد که میانگین آنتالپی ذوب Ne-PCM حاوی نانوذره سیلیکا و نانوذره اکسیدمس بدون در نظر گرفتن سایر متغیرها به ترتیب برابر  $۱۵۲/۰۱ \text{ J/g}$  و  $۱۴۶/۶۵ \text{ J/g}$  بوده است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، Ne-PCM حاوی نانوذره سیلیکا کمتر تحت تأثیر روند کاهش آنتالپی ذوب قرار گرفته است.

به‌منظور بررسی تأثیرات سه عامل اصلی نوع، اندازه و درصد وزنی نانوذره روی آنتالپی ذوب Ne-PCM، خلاصه نتایج تجزیه واریانس آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

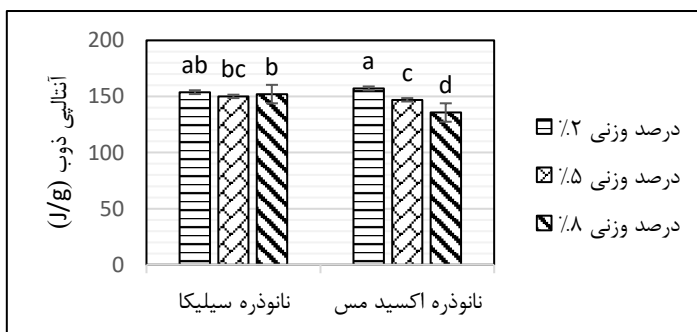
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تأثیر متغیرها بر آنتالپی ذوب Ne-PCMs

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
نوع نانوذره (A)	۱	۳۸۸/۴۹	۲۱/۶۵**
درصد وزنی (B)	۲	۶۱۶/۷۴	۳۴/۷۲**
اندازه نانوذره (C)	۲	۶۰/۷۰	۳/۳۸ <sup>ns</sup>

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
اثر متقابل A×B	۲	۴۶۱/۵۳	۲۵/۷۲**
اثر متقابل A×C	۲	۴۲/۵۷	۲/۳۷ <sup>NS</sup>
اثر متقابل B×C	۴	۱۹/۵۵	۱/۰۹ <sup>NS</sup>
اثر متقابل A×B×C	۴	۳۲/۰۳	۱/۷۸ <sup>NS</sup>
خطا	۳۶	۱۷/۹۴	

\*\* اثر معنی‌دار در سطح ۱٪، \* اثر معنی‌دار در سطح ۵٪ و <sup>NS</sup> اثر معنی‌دار ندارد.

از جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر عوامل نوع نانوذره و درصد وزنی آن در سطح ۱ درصد بر آنتالپی ذوب Ne-PCM معنی‌دار است اما اندازه نانوذرات به کار گرفته شده بر آنتالپی ذوب، بی‌تأثیر است؛ همچنین تأثیر متقابل نوع نانوذره در درصد وزنی آن نیز در سطح ۱ درصد بر مقدار آنتالپی ذوب Ne-PCM معنی‌دار است. به علت معنی‌دار شدن اثر متقابل نوع نانوذره در درصد وزنی آن در سطح ۱ درصد بر آنتالپی ذوب، به کمک آزمون دانکن در شکل ۵ مقایسه میانگین انجام شده است. میانگین‌های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن دارند.



شکل ۵. مقایسه میانگین آنتالپی ذوب در غیاب اندازه نانوذره

مطابق شکل ۵، مقدار آنتالپی ذوب برای Ne-PCM با نانوذره اکسیدمس و در همه درصدهای وزنی آن از نظر آماری اختلاف معنی‌دار دارند. لیکن درصدهای وزنی مختلف نانوذره سیلیکا، اختلاف معنی‌دار برای آنتالپی ذوب Ne-PCM ایجاد نکرده است. همچنین همان‌طور که پیشتر مطرح شد، با افزایش درصد وزنی نانوذرات افزوده شده، آنتالپی ذوب به‌طور نسبی کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه افزایش نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده باعث بروز آثار بسیار مطلوبی از جمله افزایش ضریب هدایت حرارتی [۳۸] و گرمای نهان [۳۹] می‌شود اما باعث کاهش آنتالپی ذوب می‌شود؛ از این رو برای داشتن هم‌زمان ضریب هدایت حرارتی و آنتالپی ذوب مطلوب باید برای انتخاب درصد وزنی نانوذره به مسامحه‌ای تن در دهیم.

### بررسی ضریب نفوذ حرارتی

نتایج اندازه‌گیری مقادیر میانگین ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM با اعمال متغیرهای موردبررسی در جدول ۴ ارائه شده است. شایان ذکر است که مقدار ضریب نفوذ حرارتی برای نمونه شاهد  $6/0.3 \text{ cm}^2/\text{s}$  به‌دست آمده است.

جدول ۴. مقادیر میانگین و انحراف معیار ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCMs برحسب  $\text{cm}^2/\text{s}$

درصد وزنی	اندازه نانوذره (nm)	متغیر	$\alpha$ با نانوذره $\text{SiO}_2$	$\alpha$ با نانوذره $\text{CuO}$
۲٪	۳۰	میانگین	۱۰/۲۰	۹/۹۲
		انحراف معیار	۰/۲	۰/۴
	۷۰	میانگین	۹/۲	۸/۷۲
		انحراف معیار	۰/۷	۰/۴
۵٪	۱۱۰	میانگین	۱۱/۸۶	۹/۳۲
		انحراف معیار	۰/۴	۰/۲
	۳۰	میانگین	۱۱/۵۸	۱۱/۳۶
		انحراف معیار	۰/۵	۰/۷
۵٪	۷۰	میانگین	۱۰/۴۶	۶/۴۴
		انحراف معیار	۰/۶	۰/۳
	۱۱۰	میانگین	۱۱/۳۶	۹/۶۲
		انحراف معیار	۱/۰۱	۰/۳
۸٪	۳۰	میانگین	۱۰/۸۴	۹/۷۸
		انحراف معیار	۰/۶	۰/۶
	۷۰	میانگین	۱۱/۹۲	۷/۵۴
		انحراف معیار	۰/۴	۰/۴
۱۱۰	میانگین	۹/۹۲	۱۰/۳۴	
	انحراف معیار	۰/۴	۰/۹	

میانگین ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM با نانوذرات اکسیدمس و سیلیکا و بدون در نظر گرفتن سایر متغیرها، به ترتیب  $9/25 \text{ cm}^2/\text{s}$  و  $10/79 \text{ cm}^2/\text{s}$  به‌دست آمد که هر دو از مقدار ضریب نفوذ حرارتی برای نمونه شاهد بیشتر است. دلیل افزایش ضریب نفوذ حرارتی مواد تغییرفازدهنده حاوی نانوذرات نسبت به مواد خالص، تشکیل ساختار عبور شبکه‌ای<sup>۱</sup> از نانوذرات پراکنده شده در ماده پایه است. در واقع این ساختار شبکه‌ای باعث تسهیل نفوذ حرارت در عمق ماده می‌شود [۸]. همچنین از بررسی مقادیر میانگین ضریب نفوذ حرارتی نتیجه می‌شود که بیشترین میزان آن به مقدار  $11/92 \text{ cm}^2/\text{s}$  در نمونه S8M رخ داده است و کم‌ترین مقدار آن به میزان  $6/44 \text{ cm}^2/\text{s}$  برای نمونه C5M ایجاد شده است. ضمن این‌که از این نتایج این‌گونه برمی‌آید که روند تغییرات ضریب نفوذ حرارتی در هر دو

<sup>1</sup> Percolation network

نانوذره و در هر سه اندازه و از بیشینه به کمینه به ترتیب برای درصد وزنی ۵ درصد به مقدار  $17/17 \text{ cm}^2/\text{s}$ ، ۱۰ درصد در درصد وزنی ۸ درصد به مقدار  $10/05 \text{ cm}^2/\text{s}$  و در نهایت برای درصد وزنی ۲٪ به مقدار  $9/84 \text{ cm}^2/\text{s}$  واقع شده است. برای تحلیل بهتر برون دادهای این تحقیق، تجزیه واریانس نتایج انجام گرفت. خلاصه نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داده شده است.

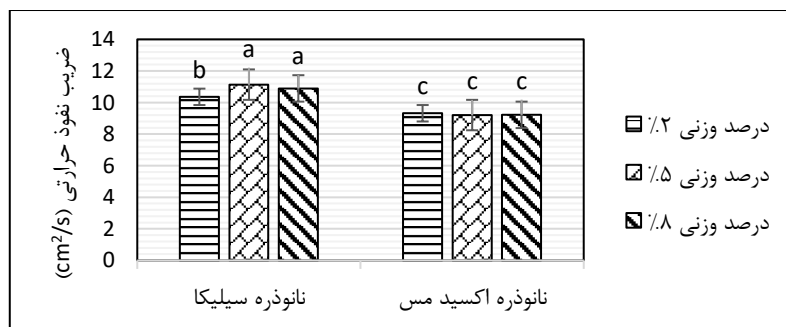
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع، اندازه و درصد وزنی نانوذره بر میزان ضریب نفوذ حرارتی Ne-

PCMs

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
نوع نانوذره (A)	۱	۵۳/۸۲	۱۷۶/۷۳**
درصد وزنی (B)	۲	۰/۸۴	۲/۷۷ <sup>ns</sup>
اندازه نانوذره (C)	۲	۲۰/۲۲	۶۶/۳۹**
اثر متقابل A×B	۲	۱/۵۶	۵/۱۴**
اثر متقابل C×A	۲	۱۱/۴۸	۳۷/۷**
اثر متقابل C×B	۴	۴/۷۵	۱۵/۶۲**
اثر متقابل A×B×C	۴	۸/۰۵	۲۶/۴۳**
خطا	۷۲	۰/۳۱	

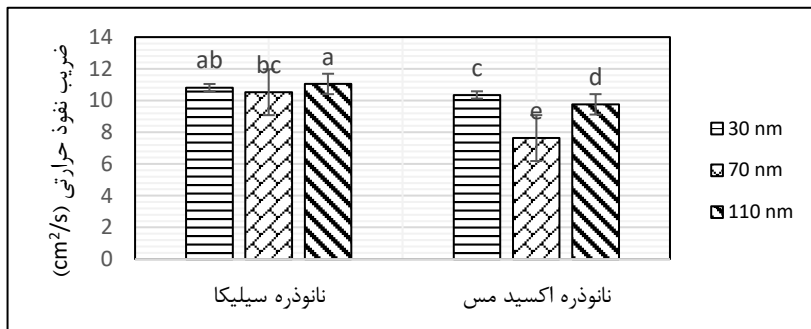
\*\* اثر معنی‌دار در سطح ۱٪، \* اثر معنی‌دار در سطح ۵٪ و ns اثر معنی‌دار ندارد.

از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که اثر عوامل اندازه و نوع نانوذره در سطح ۱ درصد بر ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM معنی‌دار است اما درصد وزنی نانوذرات به کار گرفته شده بر ضریب نفوذ حرارتی بی‌تأثیر است؛ همچنین اثر متقابل نوع نانوذره و درصد وزنی آن، اثر متقابل اندازه نانوذره و نوع آن و اثر متقابل درصد وزنی نانوذره و اندازه آن نیز در سطح ۱ درصد بر مقدار ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM معنی‌دار است. این نشان می‌دهد که میزان افزایش ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM در اندازه‌های مختلف و انواع مختلف تحت تأثیر درصد وزنی نانوذره قرار گرفته است. به علت معنی‌دار شدن آثار متقابل مذکور در سطح ۱ درصد بر ضریب نفوذ حرارتی، به کمک آزمون دانکن در شکل ۶ تا ۸، مقایسه میانگین انجام شده است. میانگین‌های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن دارند.



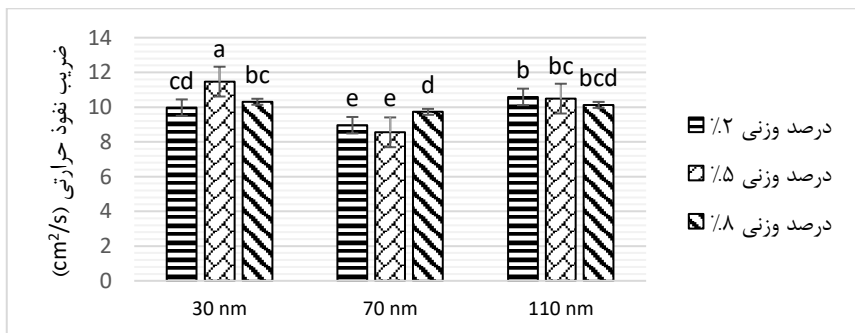
شکل ۶. مقایسه میانگین ضریب نفوذ حرارتی در غیاب اندازه نانوذره

طبق شکل ۶، مقادیر ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM، برای نانوذره اکسیدمس و در هر سه درصد وزنی به کار گرفته شده، از نظر آماری اختلاف معنی دار ندارند. همچنین برای نانوذره سیلیکا و در دو درصد وزنی ۵٪ و ۸٪ اختلاف معنی داری مشاهده نشده است. همچنین مشاهده می شود که همواره ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM با نانوذره اکسیدمس کمتر از مقدار مشابه آن با نانوذره سیلیکا بوده است.



شکل ۷. مقایسه میانگین ضریب نفوذ حرارتی در غیاب غلظت نانوذره

براساس شکل ۷، مقادیر ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM برای نانوذره اکسیدمس و در هر سه اندازه به کار گرفته شده، از نظر آماری اختلاف معنی دار دارند. همچنین برای نانوذره سیلیکا و در دو اندازه ۷۰nm و ۱۱۰nm اختلاف معنی دار مشاهده شده است. با مقایسه اندازه های نظیر، مشاهده می شود که ضریب نفوذ حرارتی، برای Ne-PCM ارتقا داده شده با نانوذره سیلیکا بیشتر از مقدار مشابه آن با نانوذره اکسیدمس است؛ لذا از این نظر نانوذره سیلیکا نتیجه بهتری را نشان می دهد.



شکل ۸. مقایسه میانگین ضریب نفوذ حرارتی در غیاب نوع نانوذره

مطابق شکل ۸، مقادیر ضریب نفوذ حرارتی برای اندازه ۱۱۰nm و در هر سه درصد وزنی به کار گرفته شده، از نظر آماری اختلاف معنی دار ندارند. همچنین برای اندازه ۷۰nm و در دو درصد وزنی ۲٪ و ۵٪ اختلاف معنی داری مشاهده نشده است. در تحقیقات گذشته در زمینه تأثیر مواد نانو ساختار بر نفوذ حرارتی مواد تغییرفازدهنده نتایج گوناگونی

گزارش شده است؛ برای مثال در پژوهشی، تأثیر نانوذره اکسیدمس (CuO) بر مواد تغییرفازدهنده نیترات پتاسیم و نیترات سدیم سنجیده شده است. محققان این پژوهش، افزایش مقدار ضریب نفوذ حرارتی را در مواد تغییرفازدهنده مورد آزمایش شان گزارش کردند. ایشان برای توضیح دلیل افزایش ضریب نفوذ حرارتی مواد تغییرفازدهنده با افزودن مواد نانوساختار، از ارتباط بین این شاخص با چگالی و گرمای ویژه بهره گرفتند و با استفاده از نرم افزار FactSage software و به روش عددی اثبات کردند که افزایش مقدار نانوذره در ماده‌ی تغییر فاز دهنده، افزایش چگالی را در پی دارد و افزایش چگالی، باعث افزایش ضریب نفوذ حرارتی می‌شود [۹]. یافته‌های پژوهش حاضر، نتایج تحقیق مذکور را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه تأثیر متقابل سه‌گانه نوع در اندازه در درصد وزنی نانوذره بر ضریب نفوذ حرارتی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، برای بررسی بهتر این تأثیر، به مقایسه میانگین آثار متقابل سه‌گانه سه عامل مذکور بر ضریب نفوذ حرارتی به کمک آزمون دانکن پرداخته می‌شود.

جدول ۴. تغییرات ضریب نفوذ حرارتی ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) با اندازه و درصد وزنی‌های مختلف برای دو نانوذره

#### مورد استفاده در Ne-PCM

درصد وزنی	اندازه نانوذره	Cu	$\text{Al}_2\text{O}_3$
۲٪	۳۰	۹/۹۲ <sup>defg</sup>	۱۰/۰۲ <sup>def</sup>
	۷۰	۸/۷۲ <sup>h</sup>	۹/۲ <sup>gh</sup>
۵٪	۱۱۰	۹/۳۲ <sup>fgh</sup>	۱۱/۸۶ <sup>a</sup>
	۳۰	۱۱/۳۶ <sup>ab</sup>	۱۱/۵۸ <sup>ab</sup>
	۷۰	۶/۴۴ <sup>j</sup>	۱۰/۴۶ <sup>cd</sup>
	۱۱۰	۹/۶۲ <sup>efg</sup>	۱۱/۶۳ <sup>ab</sup>
۷٪	۳۰	۹/۸۷ <sup>defg</sup>	۱۰/۸۴ <sup>bc</sup>
	۷۰	۷/۴۵ <sup>i</sup>	۱۱/۹۲ <sup>a</sup>
	۱۱۰	۱۰/۳۴ <sup>cde</sup>	۹/۹۲ <sup>defg</sup>

میانگین‌هایی که با حروف مشترک مشخص شده‌اند طبق آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری به‌دست‌آمده از جدول ۶ براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد این است که تفاوت ضریب نفوذ حرارتی بین درصد وزنی ۲٪ و ۵٪ نانوذرات به‌کار گرفته شده و در دو اندازه ۳۰ nm و ۷۰ nm با یکدیگر قابل توجه است ولیکن در این دو درصد وزنی و در اندازه ۱۱۰ nm تغییر چندانی مشاهده نشده است. از طرفی برای نمونه‌های با دو اندازه ۳۰ nm و ۷۰ nm و در درصد وزنی ۲٪ حروف مشترک به‌چشم می‌خورد که حاکی از نبود اختلاف معنی‌دار بین آن‌ها است.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر افزودن نانوذرات سیلیکا و اکسیدمس با درصدهای وزنی و اندازه‌های مختلف بر دو خاصیت مهم حرارتی آنتالپی ذوب و ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM مطالعه شد. تصاویر FESEM درستی اندازه و درصد وزنی نانوذرات و پراکندگی خوب آن‌ها را تأیید کرد. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش درصد وزنی نانوذرات، آنتالپی ذوب کاهش می‌یابد که این مسئله ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را محدود می‌کند. همچنین روند قابل توجهی در تغییرات مقدار

آنتالپی ذوب با عامل اندازه نانوذره مشاهده نمی‌شود. لیکن تأثیر عامل نوع نانوذره در سطح ۱ درصد بر آنتالپی ذوب Ne-PCM معنی‌دار است و Ne-PCM حاوی نانوذره سیلیکا نسبت به اکسیدمس کمتر تحت تأثیر روند کاهشی آنتالپی ذوب قرار گرفته است. همچنین تأثیر عوامل اندازه و نوع نانوذره در سطح ۱ درصد بر ضریب نفوذ حرارتی Ne-PCM معنی‌دار است و Ne-PCM حاوی نانوذره سیلیکا ضریب نفوذ حرارتی بالاتری نسبت به اکسیدمس دارد اما درصد وزنی نانوذرات به کار گرفته شده بر ضریب نفوذ حرارتی تأثیر معنی‌دار نداشته است اما بر آنتالپی ذوب به صورت معنی‌دار مؤثر بوده است. از آنجایی که با افزایش درصد وزنی نانوذرات، آنتالپی ذوب نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد، باید متناسب با اولویت‌های موجود در سامانه ذخیره‌ساز انرژی حرارتی به انتخاب درصد وزنی نانوذره مبادرت ورزید. اگر برای طراحی، چگالی انرژی حرارتی اهمیت بیشتری دارد، توصیه می‌شود درصد وزنی کمتری از نانوذرات انتخاب شود اما اگر سرعت عمل و فزونی رسانش گرما در سامانه اهمیت دارد، درصد وزنی بیشتری از نانوذرات مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که نانوکامپوزیت ارتقا داده شده با نانوذره سیلیکا، به مراتب عملکرد بهتری نسبت به اکسیدمس داشته است، می‌توان نتیجه گرفت که این نانوذره برای بهبود خواص ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در PCM مؤثرتر است. نتایج این تحقیق برای افزایش بهره‌وری سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی که از مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌کنند مثل جمع‌کننده‌های خورشیدی مفید است.

## تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی حرارتی و سامانه‌های انرژی دانشکده مهندسی دانشگاه ساراگوسا کشور اسپانیا (GITSE)، برای برقراری امکان انجام آزمایش‌ها، قدردانی می‌شود.

## References

- [1] Afsahi, M. M., & Cheraghi Sepahvand, T. (2018). T-history: A simple and cost effective method for determining thermal properties of phase change materials (PCMs). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 15(44), 13-26. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_100519.html?lang=en](https://karafan.tvu.ac.ir/article_100519.html?lang=en)
- [2] Mohammadi, O., Shafii, M. B., Rezaee Shirin-Abadi, A., Heydarian, R., & Ahmadi, M. H. (2021). The impacts of utilizing nano-encapsulated PCM along with RGO nanosheets in a pulsating heat pipe, a comparative study. *International Journal of Energy Research*, 45(13), 19481-19499. <https://doi.org/10.1002/er.7056>
- [3] Nakhchi, M. E., Hatami, M., & Rahmati, M. (2021). A numerical study on the effects of nanoparticles and stair fins on performance improvement of phase change thermal energy storages. *Energy*, 215, 119112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119112>
- [4] Santosh, R., Kumaresan, G., Paranthaman, V., Swaminathan, M. R., & Velraj, R. (2021). Comparative investigation on heat transfer enhancement of surface-roughened and nano-dispersed phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 45(11), 15992-16005. <https://doi.org/10.1002/er.6828>
- [5] Syah, R., Davarpanah, A., Elveny, M., & Ramdan, D. (2022). Natural convection of water and nano-emulsion phase change material inside a square enclosure to cool the electronic components. *International Journal of Energy Research*, 46(3), 2403-2417. <https://doi.org/10.1002/er.7316>
- [6] Zhao, C. Y., Tao, Y. B., & Yu, Y. S. (2020). Molecular dynamics simulation of nanoparticle effect on melting enthalpy of paraffin phase change material.

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119382. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119382>
- [7] Ke, H., Pang, Z., Xu, Y., Chen, X., Fu, J., Cai, Y., Huang, F., & Wei, Q. (2014). Graphene oxide improved thermal and mechanical properties of electrospun methyl stearate/polyacrylonitrile form-stable phase change composite nanofibers. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 117(1), 109-122. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3669-7>
- [8] Shin, D., & Banerjee, D. (2015). Enhanced thermal properties of SiO<sub>2</sub> nanocomposite for solar thermal energy storage applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84, 898-902. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.100>
- [9] Myers, P. D., Alam, T. E., Kamal, R., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. (2016). Nitrate salts doped with CuO nanoparticles for thermal energy storage with improved heat transfer. *Applied Energy*, 165, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.045>
- [10] Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2016). Thermal properties and heat storage analysis of palmitic acid-TiO<sub>2</sub> composite as nano-enhanced organic phase change material (NEOPCM). *Applied Thermal Engineering*, 99, 1254-1262. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.130>
- [11] Colla, L., Fedele, L., Mancin, S., Danza, L., & Manca, O. (2017). Nano-PCMs for enhanced energy storage and passive cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 110, 584-589. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.161>
- [12] Narayanan, S. S., Kardam, A., Kumar, V., Bhardwaj, N., Madhwal, D., Shukla, P., Kumar, A., Verma, A., & Jain, V. K. (2017). Development of sunlight-driven eutectic phase change material nanocomposite for applications in solar water heating. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.refffit.2016.12.004>
- [13] Praveen, B., & Suresh, S. (2018). Experimental study on heat transfer performance of neopentyl glycol/CuO composite solid-solid PCM in TES based heat sink. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1086-1094. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.010>
- [14] Khan, Z., Khan, Z. A., & Sewell, P. (2019). Heat transfer evaluation of metal oxides based nano-PCMs for latent heat storage system application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144, 118619. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118619>
- [15] Raj, C. R., Suresh, S., Bhavsar, R. R., Kumar Singh, V., & Reddy, S. (2019). Effect of nano-gallium capsules on thermal energy storage characteristics of manganese organometallic SS-PCM. *Thermochimica Acta*, 680, 178341. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178341>
- [16] Ferfera, R. S., & Madani, B. (2020). Thermal characterization of a heat exchanger equipped with a combined material of phase change material and metallic foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 119162. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119162>
- [17] Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2014). Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 81, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.03.006>
- [18] Warzoha, R. J., Weigand, R. M., & Fleischer, A. S. (2015). Temperature-dependent thermal properties of a paraffin phase change material embedded with herringbone style graphite nanofibers. *Applied Energy*, 137, 716-725. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.091>

- [19] Yang, Y., Luo, J., Song, G., Liu, Y., & Tang, G. (2014). The experimental exploration of nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/paraffin on thermal behavior of phase change materials. *Thermochimica Acta*, 597, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.10.014>
- [20] Jafarian, M., Baradaran Motie, J., & Azadnia, R. (2021). Investigation of the effect of speed, depth, and type of tillage on soil surface roughness and burial of plant residues in rainfed lands. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.280529.1474>
- [21] Khodadadi, J. M., Fan, L., & Babaei, H. (2013). Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 418-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.031>
- [22] Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002>
- [23] Leong, K. Y., Abdul Rahman, M. R., & Gurunathan, B. A. (2019). Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*, 21, 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.008>
- [24] Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S., Shadloo, M. S., & Oztop, H. F. (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211, 118698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118698>
- [25] Manoj Kumar, P., Mylsamy, K., & Saravanakumar, P. T. (2020). Experimental investigations on thermal properties of nano-SiO<sub>2</sub>/paraffin phase change material (PCM) for solar thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(19), 2420-2433. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607942>
- [26] Yadav, C., & Sahoo, R. R. (2022). Thermal analysis comparison of nano-additive PCM-based engine waste heat recovery thermal storage systems: an experimental study. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 147(3), 2785-2802. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10611-x>
- [27] Manirathnam, A. S., Dhanush Manikandan, M. K., Hari Prakash, R., Kamesh Kumar, B., & Deepan Amarnath, M. (2021). Experimental analysis on solar water heater integrated with Nano composite phase change material (SCi and CuO). *Materials Today: Proceedings*, 37, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.093>
- [28] Zhang, X., Zhu, C., & Fang, G. (2020). Preparation and thermal properties of n-eicosane/nano-SiO<sub>2</sub>/expanded graphite composite phase-change material for thermal energy storage. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122178. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122178>
- [29] Şahan, N., Fois, M., & Paksoy, H. (2015). Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.01.027>
- [30] Lin, S. C., & Al-Kayiem, H. H. (2016). Evaluation of copper nanoparticles – Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, 132, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.004>

- [31] Li, M. (2013). A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity. *Applied Energy*, 106, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.031>
- [32] Agarwal, H., Nakara, A., & Shanmugam, V. K. (2019). Anti-inflammatory mechanism of various metal and metal oxide nanoparticles synthesized using plant extracts: A review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 109, 2561-2572. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.11.116>
- [33] Yu, Z.-T., Fang, X., Fan, L.-W., Wang, X., Xiao, Y.-Q., Zeng, Y., Xu, X., Hu, Y.-C., & Cen, K.-F. (2013). Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes. *Carbon*, 53, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.059>
- [34] Min, S., Blumm, J., & Lindemann, A. (2007). A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties. *Thermochimica Acta*, 455(1), 46-49. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.026>
- [35] Karaipekli, A., Biçer, A., Sari, A., & Tyagi, V. V. (2017). Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. *Energy Conversion and Management*, 134, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.053>
- [36] Seo, J., & Shin, D. (2016). Size effect of nanoparticle on specific heat in a ternary nitrate (LiNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>) salt eutectic for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 102, 144-148. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.134>
- [37] Tiznobaik, H., & Shin, D. (2013). Enhanced specific heat capacity of high-temperature molten salt-based nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 542-548. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.062>
- [38] Jafarian, M., Omid, M., Khanali, M., & Mokhtari Motameni Shirvan, M. (2019). Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Material for Thermal Energy Storage Using Nanotechnology. 50(2), 319-329. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.264959.665092>
- [39] Jafarian, M., Omid, M., Khanali, M., & Mokhtari, M. (2020). Investigation of the Effect of Copper and Aluminiumoxide Nanoparticles on the Thermal Energy Storage Capability of Phase Change Material. *Energy Engineering & Management*, 10(3), 78-89. <https://doi.org/10.22052/10.3.78>