

## Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Material for Thermal Energy Storage Using Nanotechnology

MOSTAFA JAFARIAN<sup>1</sup>, MAHMOUD OMID<sup>2\*</sup>, MAJID KHANALI<sup>3</sup>, MOZAFFAR MOKHTARIMOTAMENISHIRVAN<sup>4</sup>

1. PhD Student, Mechanic of Biosystem Engineering minor in renewable energies, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran.
4. Research Associate, School of Engineering, Ulster University, UK.

(Received: Sep. 10, 2018- Revised: Dec. 23, 2018- Accepted: Dec. 30, 2018)

### ABSTRACT

Among all kinds of renewable energies, the solar energy has the greatest application compared to the other types. However, the biggest shortage of solar collectors is their low effectiveness at night or in the cloudy weather. The latent heat storage of phase change materials (PCMs) can be utilized as a solution for the above-mentioned problem. However most PCMs have low thermal conductivities. In this research aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) and copper (Cu) nanoparticles were used to enhance the thermal properties of Paraffin wax as a PCM. The morphology of the nanocomposites was studied by Field Emission Scanning Electron Microscopy. The experiments were performed in a factorial arrangement in a completely randomized design with three main factors including weight percentage (three levels), type (two levels), and size of the nanoparticles (three levels) and pure Paraffin wax used as a control sample. Thermal conductivity of nanocomposites was measured at a temperature range for each sample and in the solid phase. The highest and lowest values of thermal conductivity coefficients compared to control sample have increased 442% and 122%, respectively. Analysis of variance results showed that the size, type and concentration of nanoparticles affected thermal conductivity of nanocomposites significantly ( $p < 0.01$ ). In different size of nanoparticles, thermal conductivity coefficient of nanocomposites has increased with increasing of the nanoparticle concentration. Also, the highest thermal conductivity coefficient of nanocomposites was obtained at the smallest size of the nanoparticles. The highest thermal conductivity coefficients of nanocomposites were achieved by addition of Cu nanoparticles at the weight percentage of 6% and sizes of 30 and 70 nm to Paraffin wax.

**Keywords:** Renewable Energies, Thermal conductivity, Phase change materials, Nanoparticles.

## بهبود ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با استفاده از فناوری نانو

مصطفی جعفریان<sup>۱</sup>، محمود امید<sup>۲\*</sup>، مجید خانعلی<sup>۳</sup>، مظفر مختاری مؤتمنی شیروان<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی و فناوری

کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

۲. استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

۴. محقق فوق دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه آلستر، انگلستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۰/۹)

### چکیده

امروزه اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر کسی پوشیده نیست. در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، بیشترین کاربرد را به خود اختصاص داده است. اما جمع‌کننده‌های خورشیدی در شب و یا هوای ابری کارایی خود را از دست می‌دهند. ذخیره‌سازی گرمای نهان توسط مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) می‌تواند به‌عنوان یک راه حل برای مشکل فوق به کار گرفته شود. اما اکثر PCMها، دارای ضریب هدایت حرارتی پایینی هستند. در این پژوهش برای حل این مسئله، از فناوری نانو بهره گرفته شده است. از پارافین‌واکس به‌عنوان PCM و از نانوذره اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) و نانوذره مس (Cu) جهت ارتقاء خواص حرارتی آن به‌عنوان مواد نانوساختار استفاده شدند. خواص ساختاری نانوکامپوزیت‌های ساخته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطالعه شدند. آزمایش‌ها با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ عامل اصلی، شامل درصد وزنی نانوذره (در ۳ سطح)، نوع نانوذره (در ۲ سطح) و اندازه قطر متوسط نانوذره (در ۳ سطح) و همچنین پارافین‌واکس خالص به‌عنوان نمونه شاهد، با ۳ تکرار انجام شده است. ضریب هدایت حرارتی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر انتقال حرارت نانوسیالات و PCMها، در یک گستره دمایی برای هر نمونه و در فاز جامد اندازه‌گیری شد. بیشترین و کمترین مقدار آن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۴۴٪ و ۱۲۲٪ افزایش داشته است. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر اندازه، نوع و غلظت نانوذره آمیخته شده در PCM، بر این ضریب در سطح ۱٪ معنی‌دار است، همچنین در اندازه‌های مختلف نانوذرات، با افزایش غلظت، مقدار آن افزایش می‌یابد و در اندازه‌های کوچک‌تر، ضریب هدایت حرارتی بهتری مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی‌های تجدیدپذیر، ضریب هدایت حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده، مواد نانوساختار

### مقدمه

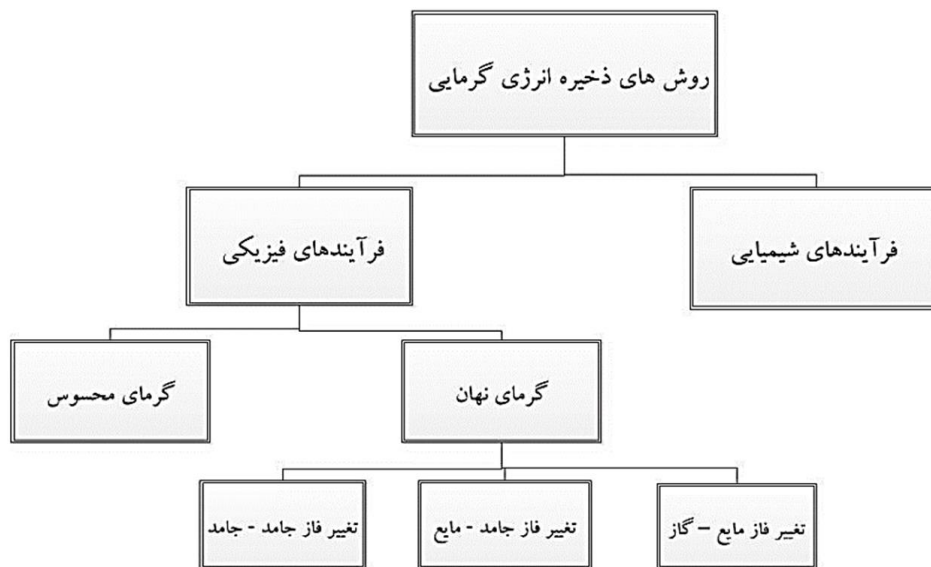
کردن محصولات زراعی، باغی و دانه‌ها، تولید آب گرم مصرفی در دامپروری‌ها، مرغداری‌ها، گلخانه‌ها و سایر تأسیسات کشاورزی اشاره نمود (Resch et al., 2008). لذا به کارگیری انرژی خورشیدی در کشاورزی، اهمیت زیادی دارد. به دام انداختن انرژی حرارتی خورشید جهت استفاده در گلخانه‌ها و نیز بهره‌برداری از الکتریسیته‌ی تولید شده از انرژی خورشیدی در دامداری‌ها و واحدهای کوچک تولیدی از راهبردهای مهم استفاده از آن می‌باشد (Motamed Shariati et al., 2016). اکثر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌خصوص انرژی خورشید، به علت ماهیت متغیر و متناوب‌شان، نیازمند روشی مناسب، جهت بهره‌برداری بهینه هستند. این موضوع، اهمیت فناوری ذخیره‌سازی انرژی حرارتی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. این فناوری می‌تواند قابلیت اطمینان و

از دیدگاه منبع تولید انرژی، انرژی‌های موجود در جهان به دو گروه عمده منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع انرژی تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند (Shepherd & Shepherd, 2014). امروزه بخش کشاورزی به منظور پاسخگویی به نیاز روزافزون غذا برای جمعیت رو به رشد کره زمین و فراهم کردن مواد غذایی کافی و مناسب، به مصرف انرژی‌های گوناگون وابسته است (Ghaderpour & Rafiee, 2017). انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که به طور گسترده در بخش کشاورزی برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود که موجب تسهیل زندگی و افزایش بهره‌وری تولید می‌گردد. از جمله این موارد می‌توان به خشک

\* نویسنده مسئول: Omid@ut.ac.ir

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به‌صورت تغییر در انرژی درونی مواد به شکل محسوس، نهان و ترموشیمیایی و یا ترکیبی از آن‌ها صورت می‌گیرد (Sharma *et al.*, 2009) (شکل ۱) ذخیره‌سازی گرمای نهان یکی از روش‌های ذخیره‌ی انرژی گرمایی است که می‌تواند انرژی حرارتی را با چگالی بسیار بالا ذخیره کند و به عنوان یک راه حل کاربردی برای مشکل فوق به کار گرفته شود.

بازده سامانه‌های تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر را بهبود بخشد. یکی از مصادیق اصلی به‌کارگیری انرژی خورشیدی که در بخش کشاورزی هم کاربرد زیادی پیدا کرده است، سامانه‌های جمع‌کننده‌ی خورشیدی<sup>۱</sup> هستند. با این وجود، بزرگ‌ترین مشکلی که امروزه کاربران این سامانه‌ها با آن مواجه هستند، عدم کارایی جمع‌کننده‌ها در شب و یا هوای ابری است. در حالت کلی



شکل ۱- انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (Sharma *et al.*, 2009)

است (Yu & Xie, 2012). سطح ویژه بالای نانوذرات، امکان انتقال حرارت بیشتر را فراهم می‌کند (Yu *et al.*, 2008). همچنین نانوذرات به علت ویژگی ذاتی که دارند سبب تغییرات محسوسی در خواص ترموفیزیکی موادی که در آن آمیخته می‌شوند، می‌گردند (Halté *et al.*, 1999). در این زمینه محققان، تحقیقات مختلفی انجام داده‌اند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. (Motahar *et al.*, 2014) در پژوهشی نانوذره‌ی اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) را در ان-اکتادکان آمیختند و ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته‌ی PCM را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در ۳٪ وزنی از نانوذره، بیشترین افزایش ضریب هدایت حرارتی رخ داده است. (Nurten *et al.*, 2015) در تحقیقی به بررسی بهبود رسانش حرارتی نوعی PCM به کمک نانوذره اکسید آهن پرداختند. این نانوذره با دو درصد وزنی ۱۰ و ۲۰ درصد استفاده شد که مقدار رسانش حرارتی، به ترتیب به میزان ۴۸ و ۶۰ درصد افزایش یافت. طرح شماتیک آماده‌سازی PCM آمیخته شده با نانوذره، در شکل نشان داده شده است. مراحل آن به ترتیب از راست به چپ، ذوب کردن پارافین، اختلاط نانوذره مذکور، حمام آلتراسونیک جهت اختلاط کامل و در نهایت جامد سازی مخلوط است.

موادی که به علت دارا بودن گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم کم در هنگام تغییر فاز، در سامانه‌های ذخیره‌سازی حرارتی استفاده می‌شوند، با عنوان کلی مواد تغییر فاز دهنده (PCMs<sup>۲</sup>) شناخته می‌شوند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انتخاب PCM عبارت‌اند از: دارا بودن گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و ضریب هدایت حرارتی بالا (Ahmed *et al.*, 2017). پایین بودن نرخ ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی موجب افت راندمان در واحدهای ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. اکثر PCM‌های متداول در صنعت، به‌خصوص پارافین‌ها و اسیدهای چرب، دارای ضریب هدایت حرارتی پایینی هستند که باعث کاهش کارایی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی که از این مواد استفاده می‌کنند می‌شود. لذا این سامانه‌ها به تنهایی توجیه اقتصادی مناسبی ندارند. برای بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، روش‌های متنوعی به کار گرفته می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: افزایش دادن سطوح انتقال حرارت، استفاده‌ی هم‌زمان از چند PCM، میکروکپسوله کردن PCM و افزودن مواد نانوساختار (Elgafy & Lafdi, 2005). با پیشرفت فناوری نانو، از ذرات فلزی و اکسیدهای فلزی با ابعاد نانو برای ارتقاء خواص حرارتی سیالات و گاهی PCM‌ها استفاده شده

بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف و اندازه‌های مختلف دو نانوذره مذکور بر ضریب هدایت حرارتی PCM مشاهده نشد. لذا هدف از انجام این تحقیق، مقایسه تأثیر نوع، غلظت و اندازه نانوذره بر ضریب هدایت حرارتی PCM مورد استفاده است.



شکل ۲. مراحل آماده‌سازی PCM آمیخته شده با نانوذره

## مواد و روش‌ها

انتقال حرارت رسانش، در واقع انتقال انرژی از ذرات پراثری یک ماده به ذرات کم انرژی مجاور است. نرخ رسانش حرارتی از یک محیط به سطح تماس، ضخامت، جنس ماده و اختلاف دما در عرض محیط بستگی دارد. انتقال حرارت به روش رسانش در داخل جسم زمانی پدید می‌آید که یک گرادیان حرارتی بین دو نقطه از جسم ایجاد شود. هر قدر گرادیان حرارتی بیشتر باشد، شدت انتقال حرارت هم زیادتر خواهد بود. به وسیله‌ی دستگاهی که در این پژوهش به کار رفته است، انتقال حرارت به طریق رسانش و یک بعدی مورد بررسی قرار گرفته است و ضریب هدایت حرارتی برای هر نمونه و فقط در فاز جامد، اندازه‌گیری شده است و در نهایت با هم مقایسه شده‌اند.

فرض اساسی تحقیق حاضر، این است که شبکه ماده، یک شبکه پیوسته است و ضریب هدایت حرارتی مؤثر ترکیب در فاز جامد، به ضریب هدایت حرارتی هر دو جزء ترکیب، غلظت ماده افزونه، اندازه ماده افزونه و توزیع ذرات افزونه بستگی دارد (Khodadadi *et al.*, 2013)

## آماده‌سازی نمونه‌ها

پارافین‌واکس مورد استفاده در این مطالعه، از یک شرکت معتبر تهیه و توزیع مواد شیمیایی و آزمایشگاهی در تهران و با گرید تجاری، ساخت شرکت ایران‌پارافین تهیه شد. مواد نوساختار شناسنامه‌دار نیز از شرکت نانومواد ایرانیان، فراهم شدند. بعضی از مشخصات پارافین‌واکس مورد استفاده در این پژوهش، از کاتالوگ شرکت سازنده استخراج گردیدند و برخی نیز اندازه‌گیری شدند و در جدول ۱ آورده شده است.

در این تحقیق نانوذره‌ی اکسید آلومینیوم و نانوذره‌ی مس در پارافین‌واکس مذاب با نسبت‌های وزنی ۱، ۳ و ۶ درصد وزنی (به ترتیب نماینده‌ی غلظت کم، متوسط و زیاد) و سه اندازه نانوذره با اقطار ۳۰، ۷۰ و ۱۱۰ نانومتر آمیخته گردید. خلاصه‌ی مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است. پارافین‌واکس خالص هم به عنوان نمونه شاهد جزء تیمارهای مورد بررسی قرار داشت. نمونه‌های PCM مورد آزمایش، با افزودن نانوذره‌های مذکور و با تکنیک پراکنش (Dispersion) آماده

استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص حرارتی نانوسیالات و PCM‌ها نظیر نانوغرافیت<sup>۱</sup> در پارافین (Li, 2013)، گرافن صفحه‌ای<sup>۲</sup> در اکتادکانول<sup>۳</sup> (Yavari *et al.*, 2011)، نانوذره اکسید مس در سیکلو هگزان<sup>۴</sup> (Fan & Khodadadi, 2012)، نانوغرافیک و نانوذره اکسید آلومینیوم در میریستیک اسید<sup>۵</sup> (Tang *et al.*, 2016) نیز گزارش شده است. پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که نانوذرات، نقش مهمی در بهبود خواص حرارتی، ترموفیزیکی و انتقال حرارت نانوسیالات و PCM‌های به کارگیری شده دارند.

هیدروکربن‌های پارافینی از جمله محصولات عمده و اصلی پالایشگاه‌ها نسبت به سایر محصولات جانبی هستند (Himran *et al.*, 1994). موم‌های پارافینی یکی از معمول‌ترین مواد ذخیره کننده انرژی حرارتی برای کاربردهای تجاری می‌باشند (Obitayo, 2011). پارافین‌واکس‌ها (PW<sup>۶</sup>)، شامل زنجیره‌ای مستقیم n-آلکان  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$  می‌باشند. کریستال‌های زنجیره  $(-\text{CH}_2)_n$ ، می‌توانند مقدار زیادی گرمای نهان را ذخیره‌سازی و آزاد نمایند. لذا پارافین‌ها به علت همین قابلیت ذاتی، در یک محدوده دمایی بالا به‌عنوان ماده‌ی ذخیره کننده‌ی گرما قابلیت به کارگیری دارند. پارافین‌ها مقاوم، ایمن، ارزان، غیرخورنده، در دسترس و دارای پایداری حرارتی و شیمیایی در تغییر فازهای متعدد هستند و با موادی که با آن‌ها در تماس هستند، سازگار می‌باشند (Colla *et al.*, 2017). آن‌ها در دمای زیر ۱۰۰ درجه سلسیوس پایدار بوده و تغییرات حجمی کمتری در حالت مذاب پیدا می‌کنند، قابلیت ذوب همگون دارند؛ همچنین در حالت مذاب، دارای فشار بخار پایین می‌باشد. به دلیل این خصوصیات، پارافین‌ها در سامانه‌هایی که شکل ذوب-انجماد طولانی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Sharma *et al.*, 2009)؛ لذا در این تحقیق پارافین‌واکس به عنوان PCM به کارگیری شده است.

بررسی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته نشان داد تاکنون از دو نانوذره مس و اکسید آلومینیوم به عنوان مواد نوساختار جهت ارتقاء ضریب هدایت حرارتی PCM به طور هم‌زمان استفاده نشده است. همچنین تحقیقی در خصوص

4. Cyclohexane  
5. Myristic acid  
6. Paraffin Wax

1. Nano-graphite  
2. Graphene flakes  
3. Octadecanol

شدند. این روش شامل ذوب، مخلوط کردن، عملیات آلتراسونیک و جامدسازی نمونه‌هاست (Nurten *et al.*, 2015).

**جدول ۱- ویژگی‌ها و مشخصات پارافین‌واکس**

خاصیت	یکا	مقدار
نقطه ذوب	°C	۶۹-۷۱
چگالی	kg/m <sup>3</sup>	۹۰۰
دمای اشتعال	°C	۳۰۰
نقطه جوش	°C	۳۵۰
نقطه روشنایی	°C	۲۱۰
ظرفیت گرمایی ویژه	kJ/kg.k	۲/۴
گرمای نهان ذوب	kJ/kg	۲۴۰

**جدول ۲- مشخصات نمونه‌های مورد ارزیابی در این تحقیق**

نام نمونه	نانوذره به کار رفته	غلظت مورد استفاده	اندازه نانوذره (nm)
C1S	مس (Cu)	۱٪	۳۰
C1M	مس (Cu)	۱٪	۷۰
C1L	مس (Cu)	۱٪	۱۱۰
C3S	مس (Cu)	۳٪	۳۰
C3M	مس (Cu)	۳٪	۷۰
C3L	مس (Cu)	۳٪	۱۱۰
C6S	مس (Cu)	۶٪	۳۰
C6M	مس (Cu)	۶٪	۷۰
C6L	مس (Cu)	۶٪	۱۱۰
A1S	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱٪	۳۰
A1M	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱٪	۷۰
A1L	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱٪	۱۱۰
A3S	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۳٪	۳۰
A3M	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۳٪	۷۰
A3L	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۳٪	۱۱۰
A6S	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۶٪	۳۰
A6M	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۶٪	۷۰
A6L	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۶٪	۱۱۰

سپس نانوذرات با ترازوی دیجیتالی مدل BP121S ساخت شرکت Sartorius با دقت ۰/۰۰۱ گرم به دقت وزن شده و طبق نسبت وزنی در نظر گرفته شده، به محفظه‌ها افزوده شدند (Li, 2013) (شکل ۲- ب). برای پایداری ماتریس ایجاد شده و بهبود برهم‌کنش نانوذرات با پارافین‌واکس و ممانعت از تهنشینی نانوذرات در ماتریس در هنگام تغییر فاز، از سازگارکننده اسیداولئیک به مقدار ۱٪ وزنی استفاده گردید (Nurten *et al.*, 2015). پس از افزودن سازگارکننده، نمونه‌ها روی دستگاه همزن مغناطیسی حرارتی مدل DX300 ساخت شرکت Techne قرار داده شدند و با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۷۰°C، به مدت یک ساعت به خوبی مخلوط شدند (شکل ۲- ج) (Warzoha *et al.*, 2015). سپس دستگاه همگن‌ساز فراصوتی مدل UP100H ساخت شرکت hielscher، با توان ۱۰۰ وات، جهت همگن‌سازی ماتریس مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه تحت تأثیر قرار داده شدند (شکل ۲- د) (Colla *et al.*, 2017). روش آلتراسونیک، به علت تماس مستقیم پروب با سیال، توزیع یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند. برای حفظ حالت مذاب نمونه‌ها، هنگام عمل موج‌دهی آلتراسونیک محفظه‌ها درون حمام آب قرار داشتند. فرکانس آلتراسونیک ۳۵ کیلوهرتز تنظیم شد تا اختلاط یکنواخت ایجاد شود و از کلوخه شدن نانوذره اجتناب گردد (Lin & Al-Kayiem, 2016). بعد از آن نمونه‌ها به سرعت درون محفظه‌های مدل ریخته شدند و در دمای محیط آزمایشگاه، به حال خود رها گردیدند تا جامد شوند و آماده آزمون شوند (شکل ۲- ه). این نمونه‌ها به نام ماده‌ی تغییر فاز دهنده ارتقاء داده شده با مواد نانو ساختار (Ne-PCM<sup>۱</sup>) شناخته می‌شوند.

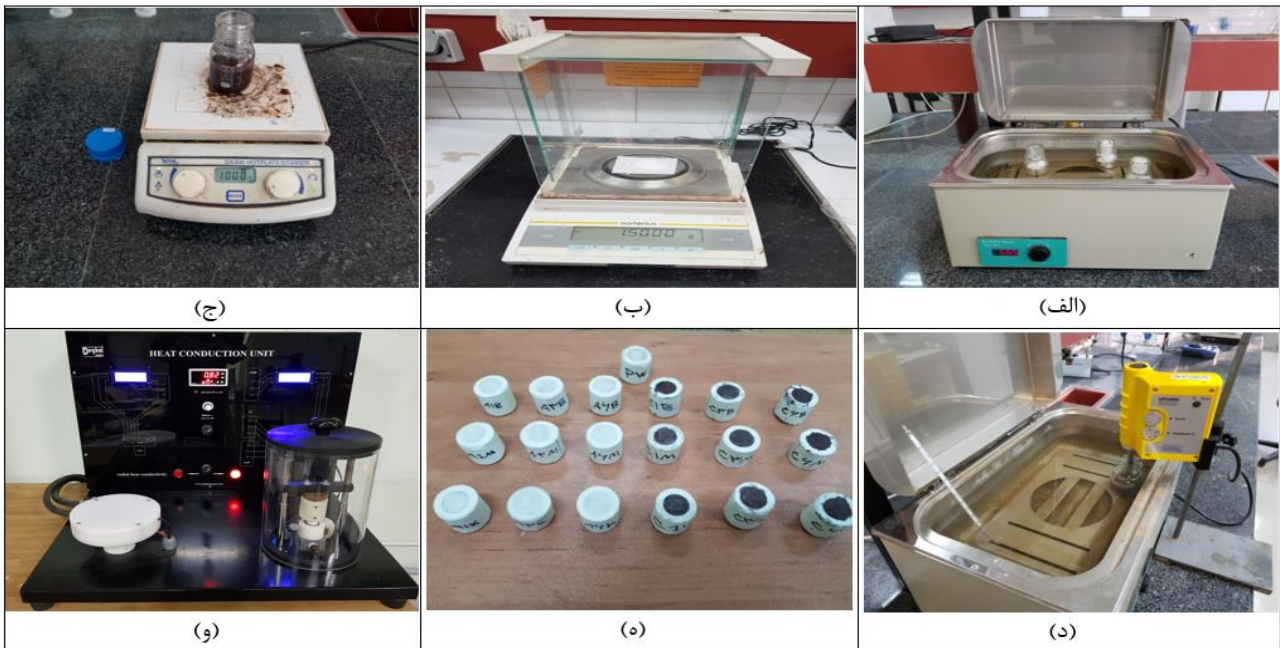
#### ریزساختارشناسی نمونه‌ها با استفاده از FESEM

به منظور تشخیص اندازه و شکل واقعی نانوذرات به کار گرفته شده در ماتریس Ne-PCM، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) که از دقیق‌ترین روش‌های ریزساختارشناسی به شمار می‌رود، به کار گرفته شد. مبنای عملکرد این میکروسکوپ، برهم‌کنش پرتوی الکترونی با ماده است. پرتوهای ساطع شده از این برهم‌کنش می‌توانند جهت بررسی‌های ریزساختاری مورد استفاده قرار گیرند (Yu *et al.*, 2013). عکس‌برداری‌ها با استفاده از دستگاه FESEM مدل BRNO- Mira3 LMU ساخت شرکت TESCAN متعلق به پژوهشکده‌ی بوعلی دانشگاه علوم پزشکی مشهد انجام گرفت.

نمونه‌های پارافین‌واکس با ترازوی دیجیتالی مدل 2200C ساخت شرکت Precisa با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند و وارد محفظه‌های اتوکلاو شدند. محفظه‌ها در حمام آب (Water bath) قرار داده شدند، برای اطمینان از ذوب کامل پارافین‌واکس دمای حمام آب روی ۸۰°C تنظیم شد (شکل ۲ - الف). نمونه‌ها به مدت یک ساعت درون حمام آب باقی ماندند تا ذوب یکنواخت پارافین‌واکس درون محفظه‌ها صورت گیرد (Lin & Al-Kayiem, 2016).

۲. Field Emission Scanning Electron Microscope

۱. Nanostructure-enhanced PCM



شکل ۱- (الف) ذوب کردن نمونه‌ها، (ب) توزین نمونه‌ها، (ج) مخلوط کردن مغناطیسی-حرارتی، (د) فرآیند آلتراسونیک، (ه) جامد سازی نمونه‌ها، (و) اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها

### روش اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها از دستگاه آزمون انتقال حرارت ساخت شرکت دقت آزما مدل TIKA استفاده شد (شکل ۲-و). دستگاه مذکور دارای ترموکوپل نوع k با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$  است که درجه حرارت را در نقاط مختلف نشان می‌دهد. یک المنت حرارتی جهت تولید حرارت در قسمت گرم به کار رفته است و جهت خنک نمودن قسمت سرد از آب لوله‌کشی شهر استفاده می‌شود. یک مدار برقی، توان مصرفی دستگاه را تغییر می‌دهد و مقدار توان را از طریق نمایشگر مربوطه نشان می‌دهد. طراحی دستگاه به گونه‌ای است که خطاهای آزمایش‌های مربوط به انتقال حرارت را در سه بعد به حداقل می‌رساند و همچنین از اتلاف حرارتی از طریق جابجایی و تشعشع جلوگیری می‌کند. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، واحد محوری دستگاه توسط یک لایه هوا و یک پوشش پلاستیکی محاط شده است. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی، نمونه جامد بین دو قسمت سرد و گرم دستگاه قرار داده شد و با اطلاعاتی که دستگاه در اختیار می‌گذارد و قانون فوریه (رابطه ۱)، ضریب هدایت حرارتی محاسبه گردید (Holman, 1990).

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $q$  مقدار حرارت منتقل شده از طریق رسانش در واحد زمان بر حسب وات ( $W$ )،  $k$  ضریب هدایت حرارتی بر حسب  $W/mK$ ،  $A$  سطح مقطع نمونه‌های تهیه شده بر حسب مترمربع ( $m^2$ )،  $\Delta T$  اختلاف درجه حرارت بر حسب کلوین ( $K$ ) و

$\Delta X$  طول نمونه بر حسب  $m$  است.

به منظور تعیین ضریب هدایت حرارتی، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای Ne-PCM انجام شد. برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای مطابق با استاندارد دستگاه، ابتدا ابزار نمونه‌گیر خاصی ساخته شد که از یک لوله از جنس تفلون به قطر خارجی  $20$  میلی‌متر و قطر داخلی  $12$  میلی‌متر و به ارتفاع  $20$  میلی‌متر تشکیل شده بود. Ne-PCM در زمانی که مذاب بود در نهایت دقت به درون این نمونه‌گیرها ریخته شد و در دمای محیط آزمایشگاه به مدت  $24$  ساعت قرار گرفت تا جامد شود. نمونه‌های استوانه‌ای از Ne-PCM با قطر  $12$  میلی‌متر و ارتفاع  $20$  میلی‌متر و با پوششی از جنس تفلون و ضخامت  $4$  میلی‌متر جهت جلوگیری از انتقال حرارت در جهت شعاعی، برای انجام آزمایش آماده بودند (شکل ۲-ه) (Fan & Khodadadi, 2011). ابتدا نمونه، بین دو قسمت سرد و گرم دستگاه قرار داده شد و در جای خود تثبیت گردید، سپس جریان آب سرد ورودی برقرار شد تا آب در قسمت سرد دستگاه جریان داشته باشد. توان مصرفی به وسیله کنترلر دیجیتال توان دستگاه، روی  $1$  وات تنظیم شد و به اندازه کافی به سیستم مهلت داده شد تا سیستم به تعادل دمایی برسد. سپس دمای پایین‌ترین منبع گرم و بالاترین منبع سرد یادداشت گردید. این عمل سه بار تکرار شد.

برای بررسی اثر پارامترهای معرفی شده، طراحی آزمایش بر مبنای آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با  $3$  فاکتور اصلی شامل درصد وزنی نانوذره (در  $3$  سطح)، نوع نانوذره (در  $2$



است. در واقع، افزایش غلظت نانوذرات، سبب افزایش ویسکوزیته مخلوط شده و میزان نیروی اعمالی به نانوذرات افزایش می‌یابد که سبب شکستن و کوچکتر شدن اندازه کلوخه‌های نانوذرات و توزیع بهتر آن‌ها در پارافین‌واکس می‌گردد (Karaipekli *et al.*, 2017). از طرفی پارافین‌واکس ماهیت غیرقطبی دارد و سازگارکننده‌ی اسید اولئیک دارای بخش قطبی و غیر قطبی است؛ که بخش قطبی آن با نانوذرات واکنش بهتری می‌دهد و بخش غیرقطبی آن با پارافین‌واکس. در واقع، این سازگارکننده، باعث بهبود پراکنش نانوذرات در ماتریس شده و از کلوخه‌شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند.

نتایج اندازه‌گیری مقدار میانگین ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM با تیمارهای مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. این تیمارها شامل نوع، اندازه و غلظت نانوذره به کار گرفته شده می‌باشند. لازم به ذکر است، مقدار ضریب هدایت حرارتی برای نمونه‌ی شاهد که عبارت بود از پارافین‌واکس خالص بدون افزودنی از نانوذرات،  $0.3153 \text{ W/mK}$  به دست آمده است.

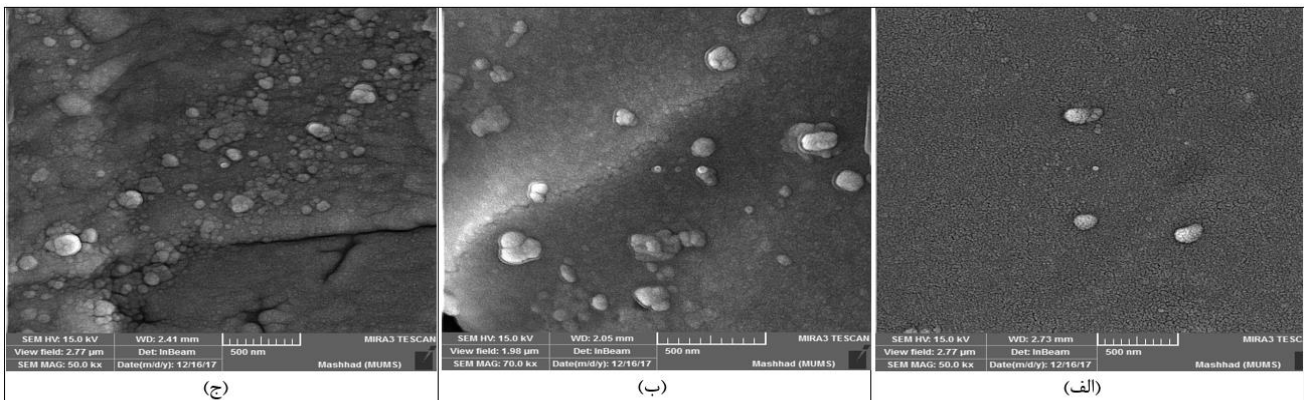
سطح) و اندازه متوسط قطر نانوذره (در ۳ سطح) به همراه نمونه شاهد و با ۳ تکرار انجام شد. برای تحلیل‌های آماری، از نرم‌افزار SPSS V16.0 استفاده شد و تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن<sup>۱</sup> انجام پذیرفت.

## نتایج و بحث

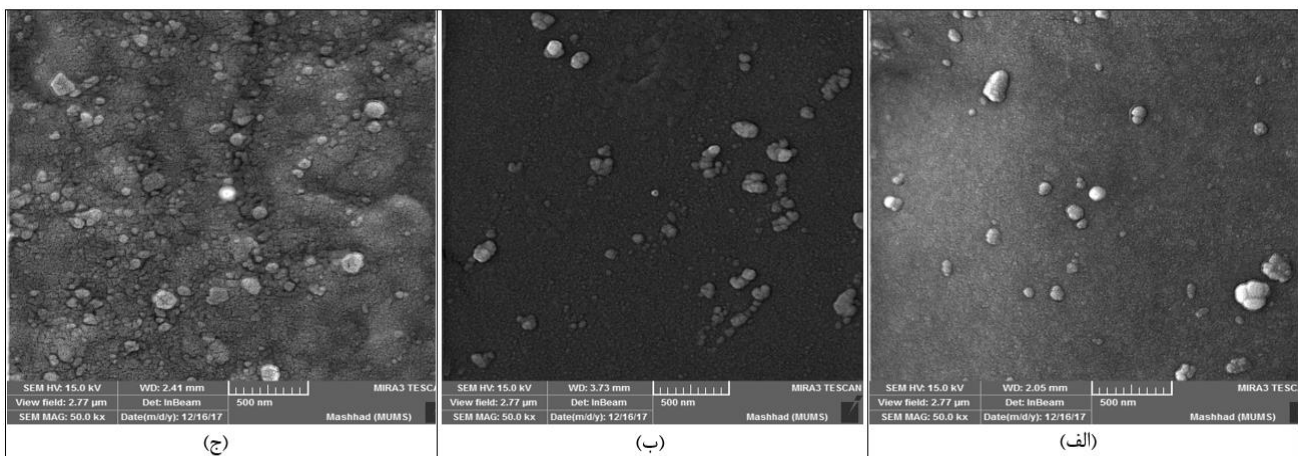
### نتایج ریزساختارشناسی نمونه‌ها

شکل ۳ و شکل ۴ تصاویر FESEM نمونه‌های Ne-PCM، به ترتیب حاوی نانوذره‌ی اکسید آلومینیوم و نانوذره‌ی مس و اندازه کوچک آن نانوذرات را نشان می‌دهد که دارای توزیع منظم و یکنواخت است و از پراکندگی قابل قبول و کلوخگی کم برخوردار است. این تصاویر امکان ریخت‌شناسی و نیز میانگین اندازه ذرات را به راحتی فراهم می‌سازد.

در هر دو شکل ۳ و شکل ۴ به طور واضح مشخص است که با افزایش غلظت نانوذره به کار رفته، پراکنش نانوذرات در Ne-PCM بیشتر می‌شود و اندازه ذرات در هر کدام، حدود  $30 \text{ nm}$



شکل ۱- تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطابق جدول ۱: (الف) A1S (ب) A3S (ج) A6S



شکل ۲- تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطابق جدول ۱: (الف) C1S (ب) C3S (ج) C6S

جدول ۳- مقادیر میانگین و انحراف معیار ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM در سطوح مختلف غلظت، اندازه و نوع نانوذره بر حسب W/mK

نوع نانوذره	غلظت ۱٪			غلظت ۳٪			غلظت ۶٪		
	۳۰ nm	۷۰ nm	۱۱۰ nm	۳۰ nm	۷۰ nm	۱۱۰ nm	۳۰ nm	۷۰ nm	۱۱۰ nm
Cu	۱/۰±۲۶/۰۲	۱/۰±۱۷/۲۰	۰/۰±۹۳/۰۳	۱/۰±۲۶/۰۲	۱/۰±۲۷/۰۲	۱/۰±۲۷/۰۲	۱/۰±۲۷/۰۲	۱/۰±۲۷/۰۲	۱/۰±۵۷/۰۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰±۸۳/۰۲	۰/۰±۷۵/۰۲	۰/۰±۷۰/۰۲	۰/۰±۹۷/۰۲	۱/۰±۰۴/۰۱	۱/۰±۱۷/۰۲	۱/۰±۲۵/۰۷	۱/۰±۱۴/۰۲	۱/۰±۱۴/۰۲

ان-آیکوسان<sup>۳</sup> هر دو به عنوان PCM آزمودند، آن‌ها نیز نتیجه گرفتند که با افزایش غلظت وزنی نانولوله کربنی در PCM از ۰/۳ درصد به ۰/۵ درصد و از آن به ۱ درصد روند افزایشی طی می‌شود. همچنین از این نتایج این‌گونه برمی‌آید که ضریب هدایت حرارتی PCM حاوی نانوذره مس بیشتر از PCM حاوی نانوذره اکسید آلومینیوم می‌باشد که از جمله دلایل، آن ضریب هدایت حرارتی بالاتر فلز مس نسبت به اکسید آلومینیوم، پراکندگی و عدم تجمع نانوذرات مس در PCM نسبت به اکسید آلومینیوم می‌باشد (Wang et al., 2016). به نظر می‌رسد تفاوت مقادیر به دست آمده در این تحقیق با تحقیقات دیگر، ناشی از نوع مواد به کار رفته و شرایط آزمایش است.

بر اساس جدول ۴، با تجزیه واریانس تأثیرات سه فاکتور اصلی نوع، اندازه و غلظت نانوذره روی پارامتر ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM بررسی گردید.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع، اندازه و غلظت نانوذره بر میزان

ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM			
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
نوع نانوذره (A)	۱	۱/۸۳۶	۴۸۳/۳۹۸**
غلظت (B)	۲	۱/۰۶۶	۲۸۰/۶۱۱**
اندازه نانوذره (C)	۲	۰/۰۶۹	۱۸/۱۴۴**
اثر متقابل A×B	۲	۰/۰۴۴	۱۱/۶۶۳**
اثر متقابل C×A	۲	۰/۰۱۷	۴/۵۹۱*
اثر متقابل C×B	۴	۰/۰۲۵	۶/۵۳۶**
اثر متقابل A×B×C	۴	۰/۰۰۳	۰/۹۱۵ <sup>ns</sup>
خطا	۳۶	۰/۰۰۴	

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

از جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت، اثر فاکتورهای اندازه، نوع و غلظت نانوذره در سطح ۱٪ بر ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM معنی‌دار است و همچنین اثر متقابل نوع نانوذره و غلظت آن و اثر متقابل اندازه نانوذره و غلظت آن نیز در سطح ۱٪ بر مقدار ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM معنی‌دار است این نشان می‌دهد که میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM در

با توجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت در غلظت‌های مختلف با افزایش اندازه نانوذره، مقدار ضریب هدایت حرارتی (k) غالباً کاهش می‌یابد. در واقع کوچک بودن نانوذره، توانایی رسانش حرارتی Ne-PCM را بهبود می‌بخشد، به این دلیل که افزایش سطح ذرات در واحد حجم آن، افزایش k را امکان‌پذیر می‌سازد (Patel et al., 2003)، (Anoop et al., 2009)، این موضوع را روی نانوسیالات آزمودند آن‌ها نانوذره اکسید آلومینیوم را در اندازه ۴۵ و ۱۵۰ نانومتر تهیه کردند و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب را سنتز کردند. نتایج آن‌ها نشان داد انتقال حرارت در نانوسیال با اندازه ذره‌ی کوچک‌تر نسبت به نانوسیال با اندازه بزرگ‌تر بهبود بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین از بررسی مقادیر میانگین ضریب هدایت حرارتی نتیجه می‌شود که بیشترین میزان k به مقدار ۱/۷۱ W/mK در PCM حاوی نانوذره مس با غلظت ۶٪ و اندازه ۳۰ و ۷۰ نانومتر (به ترتیب نمونه‌های C6S و C6M) رخ داده است؛ و همچنین کمترین میزان آن به مقدار ۰/۷۷ W/mK برای PCM حاوی نانوذره اکسید آلومینیوم و با غلظت ۱٪ و اندازه ۱۱۰ نانومتر (نمونه AIL) ایجاد شده است. در مقایسه‌ی بیشترین و کمترین مقدار k به دست آمده با مقدار شاهد، این نتیجه حاصل می‌شود که مقدار k به ترتیب برای بیشترین و کمترین حالت نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۴۴٪ و ۱۲۲٪ رشد داشته است. این روند با یافته‌های محققین قبلی تطابق دارد. (Xiao et al., 2014) با افزودن فوم مسی (Copper foam) به پارافین ۴۵۰٪ افزایش را گزارش کردند. (Oya et al., 2013) اریتریتول (Erythritol) را به عنوان PCM در نظر گرفتند و نانوذره نیکل را بدان افزودند و افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ۵۴۶٪ یافتند. برای آب یون‌زدایی شده (Deionized water) به عنوان PCM و اکسید آلومینیوم به عنوان نانوذره ارتقاء دهنده، ۱۰۷٪ افزایش ضریب هدایت حرارتی به دست آمد (Teng, 2013). همچنین با افزایش غلظت نانوذرات، میزان ضریب هدایت حرارتی PCM افزایش یافته است. این بدان علت است که با توجه به پراکندگی خوب نانوذرات در PCM، افزایش مقدار نانوذره در PCM باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی آن شده است. (Karaipekli et al., 2017) اثر غلظت نانولوله‌های کربنی<sup>۱</sup> را بر پرلیت گسترش داده شده<sup>۲</sup> و



اختلاف معنی‌دار دارند. اما مطابق شکل، فقط در غلظت ۱٪، بین هر سه اندازه، از نظر آماری اختلاف معنی‌دار مشاهده می‌شود. با توجه به شکل مشاهده می‌شود، با کوچک‌تر شدن اندازه نانوذره، ضریب هدایت حرارتی افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن افزایش سطح ذرات در واحد حجم آن است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس برای ارتقاء ضریب هدایت حرارتی PCM در حضور سازگار کننده اسید اولئیک، و با استفاده از تکنیک پراکنش آمیخته شدند. تصاویر FESEM اندازه نانوذرات در Ne-PCM را به اندازه‌ای که انتظار می‌رفت تأیید کرد. این تصاویر نشان دهنده‌ی این واقعیت است که تیمارهای مختلف Ne-PCM به خوبی تشکیل شده‌اند. مقدار ضریب هدایت حرارتی برای بیشترین و کمترین مقدار از نمونه‌ها، در مقایسه با نمونه شاهد، به ترتیب ۴۴٪ و ۱۲۲٪ رشد داشته است. استفاده از نانوذره مس با غلظت ۶٪ و اندازه ۳۰ و ۷۰ نانومتر مؤثرترین تیمار در ارتقاء ضریب هدایت حرارتی PCM بوده است. از آنجا که مقادیر ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM ارتقاء داده شده با مس به مراتب بزرگتر از مورد مشابه‌اش با اکسید آلومینیوم است، می‌توان نتیجه گرفت که این نانوذره جهت بهبود خواص ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در PCM مؤثرتر است. میانگین ضریب هدایت حرارتی، برای سه اندازه ۳۰، ۷۰ و ۱۱۰ نانومتر بدون در نظر گرفتن پارامترهای دیگر بر حسب W/mK به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۱۹ و ۱/۰۹ به دست آمد، با توجه به این روند می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر اندازه نانوذره کوچک‌تر انتخاب شود، ضریب هدایت حرارتی بهتری ایجاد می‌شود. از یافته‌های این پژوهش، جهت رفع نقیصه‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی که هم‌اکنون در بخش خانگی و کشاورزی به کار می‌روند و در ساعات ابری و شب قابل استفاده نیستند، می‌توان بهره برد. به این ترتیب که با تعبیه یک مخزن در سامانه خورشیدی، که در آن Ne-PCM قرار داده شده، به عنوان خازن حرارتی عمل نماید و حرارت لازم برای گرمایش آب را در زمان‌های مذکور، فراهم آورد.

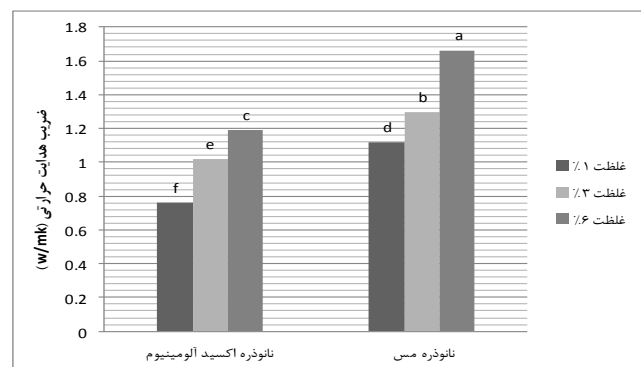
### REFERENCES

Ahmed, S. F., Khalid, M., Rashmi, W., Chan, A., & Shahbaz, K. (2017). Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.034>.

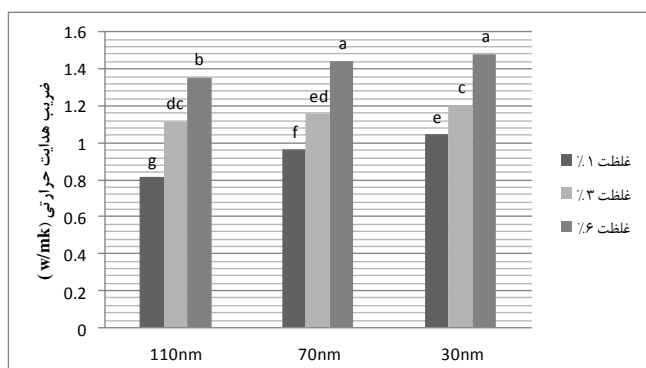
Anoop, K. B., Sundararajan, T., & Das, S. K. (2009). Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(9), 2189–2195. <https://doi.org/10.1016/>

اندازه‌های مختلف و انواع مختلف تحت تأثیر غلظت نانوذره قرار گرفته است.

به علت معنی‌دار شدن اثر متقابل نوع نانوذره در غلظت و اندازه نانوذره در غلظت در سطح ۱٪ بر روی ضریب هدایت حرارتی، به کمک آزمون دانکن در شکل و شکل مقایسه میانگین انجام شده است. میانگین‌های دارای حروف غیر مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون دانکن دارند.



شکل ۶- تغییرات ضریب هدایت حرارتی Ne-PCM با افزودن دو نانوذره با سه غلظت مختلف



شکل ۷- تغییرات ضریب هدایت حرارتی PCM با افزودن نانوذره با سه اندازه در غلظت‌های مختلف

همان‌گونه که در شکل و شکل نشان داده شده است، با افزایش غلظت نانوذرات مقدار ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. مطابق شکل، هر دو نانوذره در هر سه غلظت، با یکدیگر

[j.ijheatmasstransfer.2007.11.063](http://www.ijheatmasstransfer.com/2007.11.063).

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>.

Elgafy, A., & Lafdi, K. (2005). Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials. *Carbon*, 43(15), 3067–3074.

- <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.06.042>.
- Fan, L., & Khodadadi, J. M. (2011). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 24–46. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.007>.
- Fan, L., & Khodadadi, J. M. (2012). An experimental investigation of enhanced thermal conductivity and expedited unidirectional freezing of cyclohexane-based nanoparticle suspensions utilized as nano-enhanced phase change materials (NePCM). *International Journal of Thermal Sciences*, 62, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.11.005>.
- Ghaderpour, O., & Rafiee, S. (2017). Analysis and modeling of energy and production of dryland chickpea in the city of Bukan. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(4), 711–720. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.60265>. (In Farsi)
- Halté, V., Bigot, J.-Y. J.-Y., Palpant, B., Broyer, M., Prével, B., & Pérez, A. (1999). Size dependence of the energy relaxation in silver nanoparticles embedded in dielectric matrices. *Applied Physics Letters*, 75(24), 3799–3801. <https://doi.org/10.1063/1.125460>.
- Himran, S., Suwono, A., & Mansoori, G. A. (1994). Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources*, 16(1), 117–128.
- Jack P. Holman, & Holman, J. P. (1990). Heat Transfer, vol. 1. *McGraw-Hill, Inc, New York*, 2–4.
- Karaipekli, A., Biçer, A., Sarı, 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.
- 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>.
- 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>.
- 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>
- Motahar, S., Nikkam, N., Alemrajabi, A. A., Khodabandeh, R., Toprak, M. S., & Muhammed, M. (2014). Experimental investigation on thermal and rheological properties of n-octadecane with dispersed TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 68–74.
- Motamed Shariati, H., Mobli, H., Sharifi, M., & Ahmadi, H. (2016). Estimating Solar Radiation with Ordinary Meteorological Data in Mashhad. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(1), 185–196. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58491>. (In Farsi)
- Nurten, Ş., Fois, M., & Paksoy, H. (2015). Solar Energy Materials & Solar Cells Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites, 137, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.01.027>.
- OBITAYO, O. A. (2011). Simulation and analysis of phase change materials for building temperature control. *University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom*.
- Oya, T., Nomura, T., Tsubota, M., Okinaka, N., & Akiyama, T. (2013). Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 825–828.
- Patel, H. E., Das, S. K., Sundararajan, T., Sreekumaran Nair, A., George, B., & Pradeep, T. (2003). Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83(14), 2931–2933. <https://doi.org/10.1063/1.1602578>.
- Resch, G., Held, A., Faber, T., Panzer, C., Toro, F., & Haas, R. (2008). Potentials and prospects for renewable energies at global scale. *Energy Policy*, 36(11), 4048–4056. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.029>.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- Shepherd, W., & Shepherd, D. W. (2014). *Energy studies*. World Scientific Publishing Co Inc.
- Tang, Y., Su, D., Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2016). Synthesis and thermal properties of the MA / HDPE composites with nano-additives as form-stable PCM with improved thermal conductivity, 180, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.106>.
- Teng, T.-P. (2013). Thermal conductivity and phase-change properties of aqueous alumina nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 67, 369–375.
- Wang, C., Lin, T., Li, N., & Zheng, H. (2016). Heat transfer enhancement of phase change composite material: Copper foam/paraffin. *Renewable Energy*, 96, 960–965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.039>.
- 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>.

- 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(1), 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.03.006>.
- Yavari, F., Fard, H. R., Pashayi, K., Rafiee, M. A., Zamiri, A., Yu, Z., ... Koratkar, N. (2011). Enhanced thermal conductivity in a nanostructured phase change composite due to low concentration graphene additives. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(17), 8753–8758.
- Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., & Choi, S. U. S. (2008). Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 29(5), 432–460.
- Yu, W., & Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1.
- Yu, Z.-T., Fang, X., Fan, L.-W., Wang, X., Xiao, Y.-Q., Zeng, Y., 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>.