

بررسی تأثیر نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم بر قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ماده تغییر فاز دهنده

مصطفی جعفریان^۱، محمود امید^{۲*}، مجید خانعلی^۳، مظفر مختاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه

تهران، ایران

m.jafarian@ut.ac.ir

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

omid@ut.ac.ir

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

khanali@ut.ac.ir

^۴ محقق، دانشکده مهندسی، دانشگاه آلستر، انگلستان

m.mokhtari@ulster.ac.uk

چکیده: انرژی خورشیدی یکی از انواع مطلوب انرژی‌های تجدیدپذیر است؛ اما به دلیل دائمی نبودن تابش خورشید، ذخیره‌سازی آن ضروری است و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) روشی مناسب برای این منظور است. به دلیل رخ دادن فرایندهای ذوب و انجماد در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، تعیین ویژگی‌های حرارتی آن‌ها منجر به استفاده بهینه و طراحی مناسب این سامانه‌ها می‌شود. در این پژوهش از پارافین‌واکس به‌عنوان PCM و از نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس، برای ارتقای خواص حرارتی آن استفاده شده است. خواص ریزساختاری نانوکامپوزیت‌های ساخته‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطالعه شدند. آزمایش‌ها با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ عامل اصلی درصد وزنی نانوذره (در ۳ سطح)، نوع نانوذره (در ۲ سطح) و اندازه قطر متوسط نانوذره (در ۳ سطح) و پارافین‌واکس خالص، با ۳ بار تکرار انجام شد. نقطه ذوب و گرمای نهان هر نمونه با استفاده از دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان‌دهنده کاهش اندک نقطه ذوب نانوکامپوزیت با افزایش غلظت نانوذره است، درحالی‌که نوع و اندازه نانوذره، اثر معناداری بر آن ندارند. افزودن نانوذرات، اثر مطلوبی بر بهبود گرمای نهان نانوکامپوزیت داشته اما غلظت آن حد بهینه دارد. در اندازه‌های کوچک‌تر نانوذرات، گرمای نهان بیشتری مشاهده شده است. استفاده از نانوذره مس با غلظت ۱٪ و اندازه ۳۰ نانومتر مؤثرترین تیمار در ارتقای گرمای نهان نانوکامپوزیت بوده است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی انرژی، گرمای نهان، مواد تغییر فاز دهنده، نانوفناوری، نانوکامپوزیت، نقطه ذوب.

۱. مقدمه

امروزه افزایش قیمت حامل‌های انرژی و همچنین رشد بی‌سابقه در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر به توجه بیش از پیش به اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. محققان حوزه انرژی در مطالعات خود بررسی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های استحصال آن‌ها و همچنین توسعه روش‌های ذخیره‌سازی این انرژی‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از مهم‌ترین اقسام انرژی‌های تجدیدپذیر که به‌علت ویژگی‌های ممتازش در سطح جهان در حال گسترش است، انرژی خورشیدی است [۱]. اغلب منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌خصوص انرژی خورشید، به‌دلیل متناوب بودن، در تمام ساعات شبانه‌روز قابل بهره‌برداری نیستند. لذا فناوری ذخیره‌سازی انرژی حرارتی^۱ می‌تواند این نقیصه را برطرف کند. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به‌صورت تغییر در انرژی درونی مواد به شکل‌های محسوس، نهان و ترموشیمیایی و یا ترکیبی از آن‌ها صورت می‌گیرد. در حالت ذخیره‌سازی گرمای محسوس، انرژی به‌وسیله افزایش دما در جامدات یا مایعات ذخیره می‌شود. ذخیره‌سازی گرمای نهان بر اساس جذب و آزادسازی انرژی از طریق تغییر فاز از جامد به مایع، جامد به گاز یا مایع به گاز و برعکس انجام می‌پذیرد. از مزایای این روش می‌توان به چگالی بسیار بالای انرژی حرارتی ذخیره‌شده و نیز انجام این فرایند، در شرایط تقریباً دما ثابت اشاره کرد. ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی بر اساس جذب و آزاد کردن انرژی از طریق شکست و تغییر شکل پیوند مولکولی در واکنش شیمیایی کاملاً برگشت‌پذیر انجام می‌شود. موادی که برای ذخیره‌سازی گرمای نهان به کار گرفته می‌شوند، مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) نامیده می‌شوند. این مواد قابلیت جذب و ذخیره مقدار زیادی انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در فرایند تغییر فاز، اغلب از حالت جامد به مایع و برعکس اتفاق می‌افتد. این مواد هنگام تغییر فاز، بدون افزایش دما، گرما را از محیط جذب می‌کنند و زمانی که دمای محیط کاهش یابد، گرمای جذب‌شده را آزاد می‌کنند [۲].

امروزه پژوهشگران برای بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، روش‌های گوناگونی را به کار گرفته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: افزایش دادن سطوح انتقال حرارت، استفاده از لوله‌های پرده‌دار با شکل‌های مختلف، میکروکپسوله کردن PCM‌ها و افزودن موادی با قابلیت رسانایی حرارتی بالا از قبیل پودرهای فلزی [۳]. در تحقیقات جدید، محققان با به‌کارگیری فناوری نانو و افزودن

ذرات فلزی و اکسیدهای فلزی در ابعاد نانو به بهبود خواص حرارتی سیالات و حتی PCM‌ها پرداخته‌اند [۴]. نانوذرات به‌دلیل سطح ویژه بالایی که دارند سبب تغییرات قابل توجهی در خواص ترموفیزیکی موادی که در آن آمیخته می‌شوند، می‌گردند [۵].

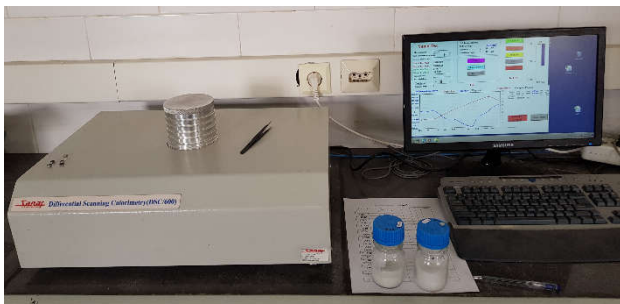
در این تحقیق، تأثیرات استفاده از دو نوع ماده نانو ساختار بر روی دو خاصیت مهم حرارتی (گرمای نهان و نقطه ذوب) PCM مورد بررسی قرار می‌گیرند. دانستن این دو خاصیت، انتخاب PCM برای طراحی سامانه‌هایی را که از این فناوری بهره می‌برند، تسهیل می‌کند. در این زمینه، پژوهش‌های گوناگونی انجام گرفته که در ادامه به بعضی از آن‌ها پرداخته می‌شود. نارایانان و همکاران در تحقیقی، برای سه نوع PCM، سه ویژگی گرمای نهان، نقطه ذوب و ضریب هدایت حرارتی را سنجیدند و با یکدیگر مقایسه کردند. در نهایت آن‌ها نتیجه گرفتند با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافیت، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بهتر صورت می‌گیرد [۶]. تسنیم و همکاران در تحقیقی، اثر انتقال حرارت از نوع رسانش را برای فرایند ذوب PCM ارتقا داده شده با مواد نانو ساختار بررسی کردند، آن‌ها با ساده‌سازی روابط و استفاده از اعداد فوریه، استفان، ریلی و ناسلت به حل عددی فرایند مذکور پرداختند. ایشان برخی خواص PCM مذکور را اندازه‌گیری کردند و به‌عنوان نتیجه بیان کردند، مدل‌سازی ارائه‌شده برای پیش‌بینی نحوه اجرای فرایند ذوب در سامانه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با ماده مذکور می‌تواند به کار رود [۷]. در پژوهشی دیگر در همین زمینه، به بررسی خواص حرارتی PCM پرداخته شد. محققان این پژوهش به بررسی تغییرات خواص حرارتی از جمله نقطه ذوب موم پارافین با و بدون نانولوله کربنی چندلایه پرداختند. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی در نزدیکی نقطه ذوب به‌طور ناگهانی کاهش و با تغییر فاز از مایع به جامد به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد؛ که هرچه غلظت نانولوله کربنی در موم پارافین افزایش یابد، روند تغییرات کمتر می‌شود [۸]. کولا و همکاران، PCM حاوی مواد نانو ساختار را برای ارتقای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و کاربردهای سرمایش و گرمایش غیرفعال آزمودند. آنان امکان استفاده از نانوذره‌های اکسید آلومینیوم و کربن سیاه را برای ارتقای ویژگی‌های حرارتی پارافین واکس به‌عنوان PCM بررسی کردند. این ویژگی‌ها شامل ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و گرمای نهان بودند. نتیجه‌گیری آن‌ها این بود که PCM حاوی مواد نانو ساختار، یک راه حل عملی و جذاب برای کاهش و یا حذف محدودیت‌های ذاتی مواد تغییر فاز دهنده از جمله پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن‌هاست [۹]. شایینگ و همکاران در پژوهشی عددی، افزودن ۱ درصد وزنی نانوذره مس را در پارافین به‌عنوان PCM

دستگاه آنالیز گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC^۱)، وسیله ارزیابی رفتار حرارتی مواد در حضور گازهای مختلف است. نمونه‌های مجهول و شاهد مقادیر متفاوتی انرژی حرارتی دریافت می‌کنند تا دمای آن‌ها همیشه یکسان بماند و تفاوت انرژی لازم برای ثابت نگه‌داشتن دما، به‌صورت تابعی از دما و زمان اندازه‌گیری می‌شود [۲۰]. آزمایش گرماسنجی روبشی تفاضلی، اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط واتسون و اونیل توسعه یافت و در سال ۱۹۶۳ در همایش شیمی تجزیه و طیف‌سنجی کاربردی در پترزبورگ به‌صورت تجاری عرضه شد [۲۱].

با بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های گذشته، پژوهشی در خصوص بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف و اندازه‌های مختلف دو نانوذره اکسید آلومینیوم و مس بر گرمای نهان و نقطه ذوب PCM مشاهده نشد. لذا هدف از انجام این تحقیق، مقایسه گرمای نهان و نقطه ذوب PCM مورد استفاده، با افزودن این دو نوع نانوذره با غلظت‌های مختلف و اندازه‌های مختلف است.

۲. مواد و روش‌ها

به‌وسیله دستگاه DSC که در این پژوهش به کار گرفته شد (شکل ۱)، گرمای نهان و نقطه ذوب برای هرکدام از نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید و در نهایت با هم مقایسه شدند.



شکل (۱): دستگاه DSC استفاده‌شده در این تحقیق

۱.۲. مواد و تجهیزات

پارافین‌واکس و مواد نانوساختار مورد استفاده در این تحقیق، به ترتیب از شرکت ایران‌پارافین و شرکت نانومواد ایرانیان تهیه شدند. مشخصات پارافین‌واکس مورد استفاده در این مطالعه، برگرفته از کاتالوگ شرکت سازنده در جدول (۱) آورده شده است.

آزمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند این عمل ۱۳/۱٪، مدت‌زمان ذوب را افزایش می‌دهد و نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد [۱۰]. لی در پژوهشی، نانوگرافیت را در پارافین به‌عنوان PCM، درآمیخت و یک PCM جدید با نرخ انتقال حرارت بالا ساخت و مورد ارزیابی قرار داد؛ در پژوهش او، ریز ساختارشناسی با میکروسکوپ الکترونی (SEM) و ویژگی‌های حرارتی PCM ساخته‌شده با گرماسنج روبشی تفاضلی سنجیده شدند. نتایج بیان کرد که لایه‌های نانوگرافیت به‌طور تصادفی در پارافین پخش شده‌اند و گرمای نهان با افزایش غلظت نانوذره، کاهش یافته است [۱۱]. نظیفی‌فرد و همکاران در پژوهشی نحوه ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده پارافین واکس را در هندسه کروی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند، ایشان بیان کردند که برای استفاده از پارافین‌واکس به‌عنوان PCM درون سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی لازم است نسبت سطح به حجم بهینه محفظه مورد بررسی قرار گیرد [۱۲]. تعیین خواص ترموفیزیکی در PCM‌های ارتقا داده‌شده با نانوذرات از قبیل نانوذره گرافن در استریک اسید [۱۳]، نانوفیبرگرافیتی در پارافین [۱۴]، نانوذره Si₃N₄ در پارافین [۱۵]، نانوذره TiO₂ در ان‌اکتادکان [۱۶]، نیز گزارش شده است. تحقیقات صورت‌گرفته 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 PCM‌های مورد استفاده دارند.

پارافین‌واکس‌ها شامل زنجیره مستقیم n-آلکان، با فرمول شیمیایی CH₃-(CH₂)-CH₃ هستند. کریستال‌های زنجیره (CH₃-) قادرند مقدار زیادی گرمای نهان را ذخیره‌سازی و آزاد کنند [۱۷]. بنابراین این ماده در یک محدوده دمایی بالا به‌عنوان ماده ذخیره‌کننده گرما قابلیت به‌کارگیری دارد. از جمله ویژگی‌های بارز پارافین‌ها می‌توان به ایمنی بالا، ارزان بودن، غیرخورندگی، قابلیت ذوب همگون، دسترس‌پذیری آسان و پایداری حرارتی و شیمیایی در تغییر فازهای متعدد اشاره کرد [۱۸]. همچنین پارافین‌ها با موادی که با آن‌ها در تماس هستند، سازگارند و در حالت مذاب، دارای فشار بخار پایین هستند. به‌دلیل این خصوصیات، پارافین‌ها در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹]؛ لذا در این تحقیق پارافین‌واکس به‌عنوان PCM مورد استفاده قرار گرفته است و از دو نانوذره مس و اکسید آلومینیوم به‌عنوان مواد نانوساختار برای ارتقای گرمای نهان و نقطه ذوب PCM استفاده شده است.

تحت تأثیر قرار گرفتند [۹]. در این تحقیق، دستگاه آلتراسونیک با نام تجاری Hielscher، مدل UP100H، با توان ۱۰۰ وات به کار گرفته شد. برای حفظ حالت مذاب نمونه‌ها، هنگام عمل موج‌دهی آلتراسونیک محفظه‌ها درون حمام آب قرار داشتند. فرکانس آلتراسونیک، ۳۵ کیلوهرتز در نظر گرفته شد تا اختلاط یکنواخت صورت گیرد و از کلوخه شدن نانوذرات جلوگیری شود [۲۲]. سپس نمونه‌ها به سرعت به ظرف‌های مخصوص وارد شدند و در دمای محیط آزمایشگاه، به حال خود رها شدند تا جامد شده و آمادهٔ آزمون شوند.

۲.۲. آنالیز FESEM

برای بررسی درستی اندازه و میزان غلظت واقعی نانوذرات به کار گرفته شده در ماتریس نانوکامپوزیت، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM^۲) که از دقیق‌ترین ابزارهای ریزساختارشناسی به شمار می‌رود، مورد استفاده قرار گرفت. این میکروسکوپ بر اساس برهم کنش پرتوی الکترونی با ماده عمل می‌کند. پرتوهای ساطع شده از این برهم کنش می‌توانند برای بررسی‌های ریزساختاری مورد استفاده قرار گیرند [۲۴]. تصاویر با استفاده از دستگاه FESEM مدل BRNO-Mira3 LMU ساخت شرکت TESCAN متعلق به پژوهشکدهٔ بوعلی دانشگاه علوم پزشکی مشهد تهیه شد.

۳.۲. نحوهٔ اندازه‌گیری خواص حرارتی

برای سنجش گرمای نهان و نقطهٔ ذوب نمونه‌ها از دستگاه گرماسنج رویشی تفاضلی (DSC(OIT) ساخت شرکت صنایع الکترونیک صنایع آریا، متعلق به آزمایشگاه نانوتکنولوژی گروه مهندسی صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران استفاده شد (شکل ۱).

عملکرد دستگاه DSC بر اساس سیستم جابه‌جایی حرارتی در کورهٔ درون آن و انتقال حرارت به دو ظرف تعبیه شده در آن است. اندازه‌گیری اختلاف دمای نمونهٔ مجهول و شاهد به این صورت است که محتوای هر دو ظرف با برنامهٔ حرارتی یکسان گرم می‌شوند و به کمک ترموکوپل‌های تعبیه شده، اختلاف دمای نمونه و شاهد تعیین می‌گردد. برای یکسان نگه داشتن دمای نمونه با شاهد، اگر در نمونه، پدیدهٔ گرمازا یا گرماگیر اتفاق بیفتد، مقداری انرژی به نمونه، به ترتیب داده شده یا گرفته می‌شود. بدین صورت مقدار انرژی واکنش گرمازا یا گرماگیر برحسب تابعی از دما رسم می‌شود.

جدول (۱): ویژگی‌ها و مشخصات پارافین‌واکس

مقدار	واحد	خاصیت
۶۹	°C	نقطهٔ ذوب
۹۰۰	Kg/m ³	چگالی حالت جامد (در ۱۵ °C)
۷۸۰	Kg/m ³	چگالی حالت مایع (در ۸۰ °C)
۳۰۰	°C	دمای اشتعال
۳۵۰	°C	نقطهٔ جوش
۲۱۰	°C	نقطهٔ روشنایی
۲/۴	kJ/kg.k	ظرفیت گرمایی ویژهٔ جامد
۲/۵۶	kJ/kg.k	ظرفیت گرمایی ویژهٔ مایع
۲۴۰	kJ/kg	گرمای نهان ذوب

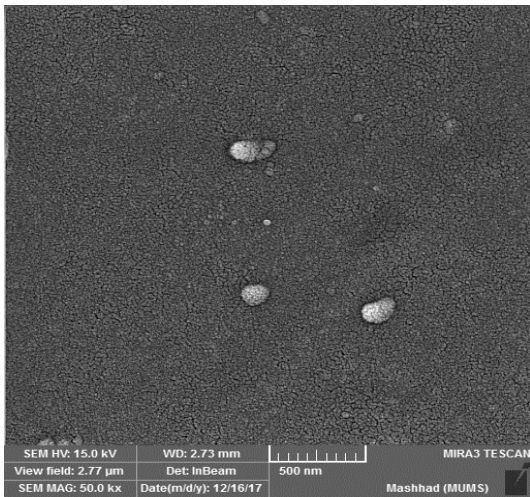
در این پژوهش از دو نانوذرهٔ اکسید آلومینیوم و مس برای آمیختن در پارافین‌واکس مذاب به‌عنوان PCM، با نسبت‌های وزنی ۱، ۳ و ۶ درصد (به ترتیب به‌عنوان غلظت کم، متوسط و زیاد) و سه اندازهٔ نانوذره با قطرهای متوسط ۳۰، ۷۰ و ۱۱۰ نانومتر استفاده شده است. نمونه‌های PCM مورد مطالعه، با افزودن نانوذره‌های مذکور و با تکنیک پراکنش^۱ آماده شدند. این روش شامل ذوب کردن مادهٔ پایه، مخلوط کردن نانوذرات، انجام عملیات آلتراسونیک و بالاخره جامدسازی نمونه‌هاست. برای مقایسهٔ نتایج با حالت بدون استفاده از مواد نانوساختار، پارافین‌واکس خالص نیز به‌عنوان نمونهٔ شاهد بررسی شد.

برای ساخت نمونه‌های مورد آزمایش، تعداد ۵۵ قطعه پارافین‌واکس به وزن ۵۰ گرم با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل 2200C ساخت شرکت Precisa با دقت ۰/۰۱ گرم آماده شدند و درون محفظه‌های اتوکلاو جای داده شدند. برای ذوب کامل و یکنواخت پارافین‌واکس‌های جامد، محفظه‌های اتوکلاو در حمام آب ۸۰°C و به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شدند [۲۲]. نانوذرات با ترازوی دیجیتال مدل BP121S ساخت شرکت Sartorius با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم به دقت وزن شدند و طبق نسبت وزنی تعریف شده در این تحقیق، به محفظه‌ها افزوده شدند. برای پایداری نانوکامپوزیت ایجاد شده و بهبود برهم‌کنش نانوذرات با پارافین‌واکس، سازگارکنندهٔ اسیداولئیک به مقدار ۱٪ وزنی استفاده شد [۲۳]. برای عملیات ترکیب نانوذرات با پارافین‌واکس، نمونه‌ها روی دستگاه همزن مغناطیسی حرارتی مدل DX300 ساخت شرکت Techne قرار گرفتند و با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۷۰°C، به مدت ۶۰ دقیقه به خوبی مخلوط شدند [۱۴]. آنگاه با امواج آلتراسونیک، به مدت ۶۰ دقیقه

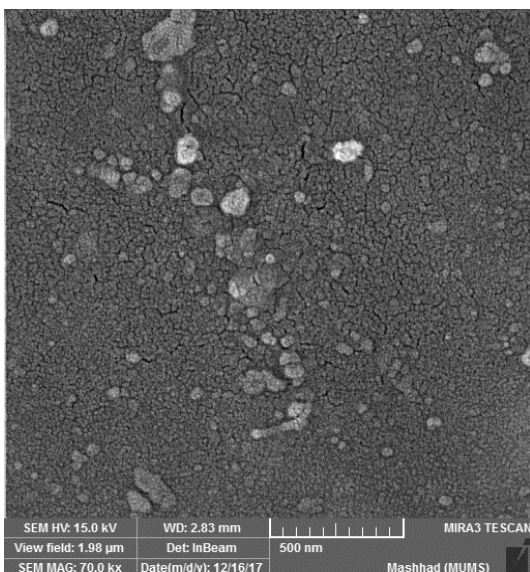
۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج به دست آمده از FESEM

تصاویر FESEM نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی نانوذره اکسید آلومینیوم و نانوذره مس برای تمام نمونه‌ها تهیه شد؛ اما در این پژوهش برای رعایت اختصار، فقط تصاویر نمونه‌های با غلظت ۱٪ وزنی و سه اندازه مورد مطالعه و برای هر دو نانوذره در شکل (۲) تا شکل (۷) آورده شده‌اند. نتایجی که از این اشکال به دست می‌آید نشان‌دهنده این است که توزیع ذرات، منظم و یکنواخت است و از پراکندگی قابل قبول و کلوخگی کم برخوردار است. این تصاویر امکان ریخت‌شناسی و نیز مشاهده میانگین اندازه ذرات و غلظت آن‌ها را به راحتی فراهم می‌سازد.



شکل (۲): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره اکسید آلومینیوم با اندازه ۳۰nm و غلظت ۱٪



شکل (۳): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره اکسید آلومینیوم با اندازه ۷۰nm و غلظت ۱٪

کالیبراسیون حرارتی دستگاه مذکور طبق استاندارد مطرح شده توسط سازنده دستگاه انجام شد. گازهای ایندیم و قلع با خلوص ۹۹/۹۹٪ برای کالیبراسیون و نیتروژن و اکسیژن با خلوص ۹۹/۹۹٪ برای آزمون استفاده شدند. فشار اعمالی به توصیه شرکت سازنده، روی ۳Bar تنظیم شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش، قطعه‌هایی از نانوکامپوزیت ساخته شده به جرم ۱۵mg جدا شدند. توزین با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل BP121S ساخت شرکت Sartorius با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم انجام شد. سپس قطعات توسط دستگاه پرس مخصوص، در داخل ظرف نگه‌دارنده نمونه از جنس آلومینیوم و به شکل استوانه فشرده شدند. با توجه به اینکه در این دستگاه، هوا به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است، در محل مخصوص مرجع، یک ظرف خالی قرار داده شد. آزمایش‌ها به صورت ذوب و سپس جامدسازی (رفت و برگشت) انجام شد. نرخ گرمایش ۵ °C/min در نظر گرفته شد [۱۴]. برای پوشش کامل فرایندها، دمای شروع تحلیل، ۲۰ °C و دمای پایان آن ۱۰۰ °C در نظر گرفته شدند که به صورت رفت و برگشت اجرا شد.

این دستگاه به طور اتوماتیک، اختلاف گرمای انتقال یافته به نمونه اصلی و نمونه مرجع را طبق رابطه (۱) محاسبه می‌کند.

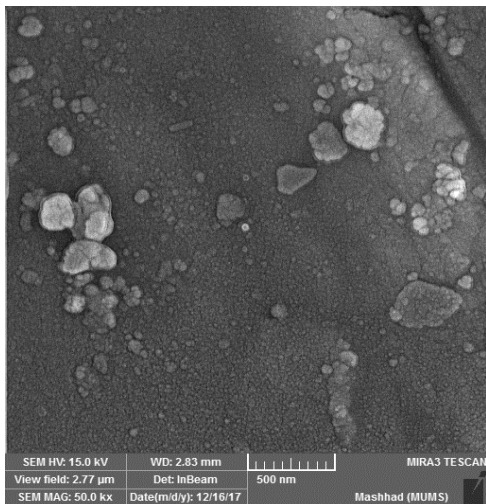
$$\left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right) = \left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right)_{\text{sample pan}} - \left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right)_{\text{reference pan}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، q میزان گرما برحسب میلی ژول و t زمان برحسب ثانیه است. اگر نمودار گرمای منتقل شده به نمونه، برحسب زمان رسم شود، سطح زیر قله نمودار، طبق رابطه (۲) بیانگر گرمای مورد نیاز برای فرایند ذوب یا همان گرمای نهان ذوب است.

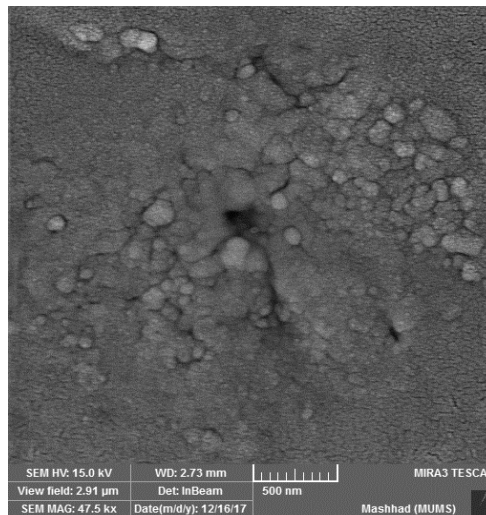
$$h_{sl} = \int_{t_l}^{t_s} \frac{dq}{dt} dt \quad (2)$$

در رابطه (۲)، t_l و t_s به ترتیب بیانگر زمان‌های متناظر با شروع و پایان فرایند ذوب هستند. مقدار فوق با انتگرال‌گیری از سطح زیر قله نمودار و خطوط مبنا به دست می‌آید. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار متلب تعیین شده‌اند.

برای بررسی اثر پارامترهای معرفی شده، طراحی آزمایش بر مبنای آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ فاکتور اصلی شامل درصد وزنی نانوذره (در ۳ سطح)، نوع نانوذره (در ۲ 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 انجام پذیرفت.



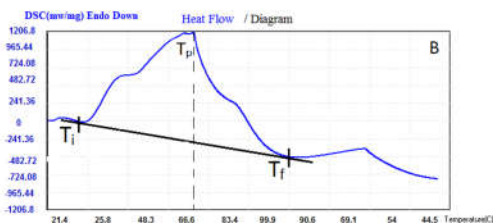
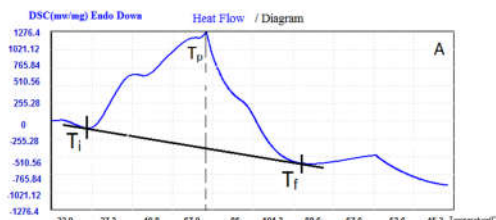
شکل (۷): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره مس با اندازه ۱۱۰nm و غلظت ۱٪



شکل (۴): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره اکسید آلومینیوم با اندازه ۱۱۰nm و غلظت ۱٪

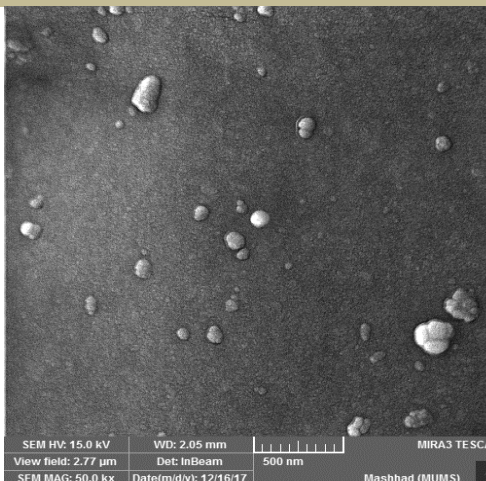
۲.۳. بررسی خواص حرارتی

با استفاده از دستگاه DSC، آزمون گرماسنجی به روی نانوکامپوزیت‌های ساخته شده انجام شد. رفتار این نانوکامپوزیت‌ها در حین گرمایش و سرمایش ثبت شد. دو خاصیت مهم حرارتی شامل گرمای نهان و نقطه ذوب برای تمام نمونه‌ها از نمودار گرمای جذب شده-دما به دست آمدند. نمونه‌ای از نمودارهای به دست آمده از آزمون گرماسنجی در شکل (۸) نشان داده شده است. شکل (A-۸) برای پارافین واکس خالص و شکل (B-۸) برای نانوکامپوزیت با نانوذره مس و اندازه ذره ۷۰ نانومتر و غلظت ۳٪ است.

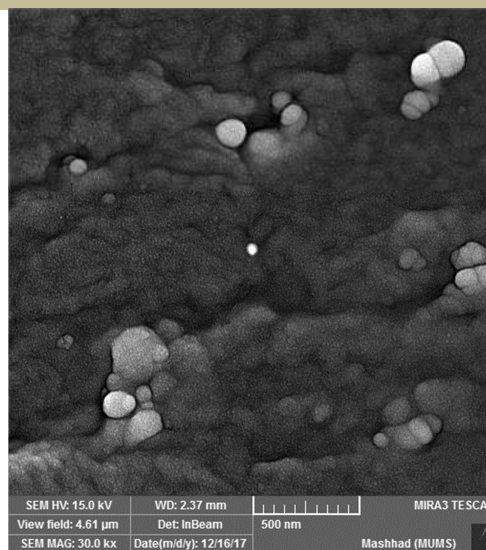


شکل (۸): نمودار DSC برای پارافین واکس خالص (A) و نانوکامپوزیت (B)

قله مشاهده شده در شکل، تغییر فاز جامد-مایع (ذوب) را نشان می‌دهد. واضح است که تغییر فاز در یک دامنه‌ای از تغییر دما رخ می‌دهد، اما مقدار بیشینه (T_p) به عنوان معیار برای مقایسه، انتخاب و گزارش شد. گرمای نهان واکنش به وسیله انتگرال گیری بین قله واکنش



شکل (۵): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره مس با اندازه ۳۰nm و غلظت ۱٪



شکل (۶): تصویر FESEM نانوکامپوزیت با نانوذره مس با اندازه ۷۰nm و غلظت ۱٪

(T_p) و خط پایه از T_i تا T_f به دست می‌آید. T_i نقطه شروع واکنش، متناظر با نقطه‌ای که در آن منحنی DSC از خط پایه اولیه جدا می‌شود و روند صعودی را آغاز می‌کند، و T_f نقطه انتهای واکنش، متناظر با بازگشت منحنی DSC به سمت خط پایه است. T_p نیز بیشینه نرخ واکنش و متناظر با اوج منحنی است [۲۵].

۱.۲.۳. تغییرات نقطه ذوب

نتایج اندازه‌گیری مقدار میانگین نقطه ذوب نانوکامپوزیت با اعمال متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است. گفتنی است مقدار نقطه ذوب برای نمونه شاهد 69°C به دست آمده است. با توجه به جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت در بیشتر نمونه‌ها با افزایش غلظت نانوذره، نقطه ذوب اندکی کاهش می‌یابد.

جدول (۲): مقادیر میانگین و انحراف معیار نقطه ذوب نانوکامپوزیت برحسب $^\circ\text{C}$

غلظت	اندازه نانوذره (nm)	متغیر	نقطه ذوب با نانوذره Al_2O_3	نقطه ذوب با نانوذره Cu
غلظت ۱٪	۳۰	میانگین	۶۹/۱۹	۶۹/۲۱
		انحراف معیار	۰/۷۳	۰/۹۰
	۷۰	میانگین	۶۹/۲۹	۶۸/۷۴
		انحراف معیار	۱/۰۰	۰/۵۴
	۱۱۰	میانگین	۶۹/۵۹	۶۹/۹۳
		انحراف معیار	۰/۵۴	۰/۵۳
هر سه اندازه		میانگین	۶۹/۳۶	۶۹/۲۹
		انحراف معیار	۰/۷۰	۰/۷۸
غلظت ۳٪	۳۰	میانگین	۶۸/۴۶	۶۸/۸۳
		انحراف معیار	۰/۴۹	۰/۶۲
	۷۰	میانگین	۶۸/۸۴	۶۸/۶۰
		انحراف معیار	۰/۵۷	۰/۳۷
	۱۱۰	میانگین	۷۰/۱	۶۸/۳۲
		انحراف معیار	۰/۳۹	۰/۱۱
هر سه اندازه		میانگین	۶۹/۱۳	۶۸/۵۸
		انحراف معیار	۰/۸۶	۰/۴۲
غلظت ۵٪	۳۰	میانگین	۶۸/۷۸	۷۰/۴۲
		انحراف معیار	۰/۶۸	۰/۴۸
	۷۰	میانگین	۶۸/۷۹	۶۹/۶۲
		انحراف معیار	۰/۶۵	۰/۶۰
	۱۱۰	میانگین	۶۸/۳۶	۷۰/۴۴
		انحراف معیار	۰/۵۵	۰/۵۱
هر سه اندازه		میانگین	۶۸/۶۴	۷۰/۱۶
		انحراف معیار	۰/۵۹	۰/۶۱

این پدیده با استفاده از اثر جذب مولکولی بر اساس قاعده پتانسیل لندارد-جونس^۱ بین نانوذرات و پارافین توجیه می‌شود. این قاعده پتانسیل، تقریبی برای توصیف برهم‌کنش میان دو ذره (اتم یا مولکول) است که در فاصله‌های دور نیروی رباینده و در فاصله‌های نزدیک نیروی راننده دارند. در غلظت زیاد نانوذرات، فاصله ذرات اندک است لذا نیروی راننده ایجاد شده بین ذرات و در نتیجه نقطه ذوب کاهش می‌یابد [۲۶].

پدیده تغییر فاز از جامد به مایع، یک پدیده گرماگیر است و گرمای جذب شده برای فائق آمدن بر جاذبه بین مولکولی نانوکامپوزیت مصرف می‌شود. برای نانوکامپوزیت‌ها انتظار می‌رود که نانوذرات آمیخته شده در پارافین واکس، نیروی بین مولکولی را افزایش دهد و نقطه ذوب افزایش یابد [۲۷]. بر اساس اطلاعات جدول (۲)، تمام میانگین نقاط ذوب در نمونه‌های مختلف به جز دو مورد، از نقطه ذوب پارافین واکس خالص بیشتر است. این روند با یافته‌های برخی محققان قبلی تطابق دارد [۲۶] و با بعضی نیز هم‌خوانی ندارد [۲۸]. برای مثال نورانی و همکاران در تحقیق خود در این زمینه، به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات، اثر محسوسی بر نقطه ذوب ندارد [۲۹]. از طرفی، در حالت کلی پایین بودن نقطه ذوب برای PCM، برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مناسب‌تر است. به این علت که پایین بودن نقطه ذوب، زمان شارژ و دشارژ PCM را که با عبور از نقطه ذوب و با ذوب شدن و انجماد اتفاق می‌افتد، کاهش می‌دهد [۲۷]. همچنین از بررسی مقادیر میانگین نقطه ذوب نتیجه می‌شود که کمترین میزان آن، به مقدار $68/32^\circ\text{C}$ در PCM حاوی نانوذره مس با غلظت ۳٪ و اندازه ۱۱۰ نانومتر رخ داده است؛ و همچنین بیشترین میزان آن به مقدار $70/44^\circ\text{C}$ برای PCM حاوی نانوذره مس و با غلظت ۶٪ و اندازه ۱۱۰ نانومتر ایجاد شده است. همچنین از این نتایج این گونه برمی‌آید که نقطه ذوب PCM حاوی نانوذره مس تفاوت چندانی با PCM حاوی نانوذره اکسید آلومینیوم ندارد. روند منطقی‌ای در تغییرات نقطه ذوب با عامل اندازه نانوذره مشاهده نشد. 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.

برای بررسی دقیق‌تر تأثیرات سه فاکتور اصلی نوع، اندازه و غلظت نانوذره روی پارامتر نقطه ذوب نانوکامپوزیت، تجزیه واریانس ($ANOVA^2$) نتایج انجام شد. جدول (۳) نتایج ANOVA را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آن می‌توان نتیجه گرفت اثر فاکتور غلظت نانوذره در سطح ۵٪ بر نقطه ذوب نانوکامپوزیت معنی‌دار است و

1. Lennard-Joes
2. Analysis of Variance

بررسی تأثیر نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم بر قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در... ۸۵

مقدار گرمای نهان برای نمونه شاهد 240 kJ/kg محاسبه شده است. طبق مقادیر جدول (۴) مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوذره، گرمای نهان برای نانوکامپوزیت با هر دو نوع نانوذره مورد استفاده کاهش می‌یابد؛ اما یک پدیده امیدوارکننده به چشم می‌خورد و آن اینکه در غلظت ۱٪ و برای هر دو نانوذره و هر سه اندازه مورد مطالعه، مقدار گرمای نهان بیشتر از مقدار آن برای پارافین‌واکس خالص است. با افزودن نانوذره با غلظت ۱٪ در پارافین‌واکس خالص، نانوکامپوزیت اندکی به سمت بی‌نظمی پیش می‌رود و آنتروپی سیستم افزایش می‌یابد. از آنجا که تغییرات حجمی سیستم هنگام افزودن نانوذره با کمترین غلظت، ناچیز است ($\Delta V=0$) و نیز فشار حاکم بر سیستم ثابت در نظر گرفته شده است، طبق رابطه‌های (۳) و (۴)، آنتالپی سیستم افزایش یافته است، لذا گرمای نهان نانوکامپوزیت با کمترین غلظت ماده افزوده شده، نسبت به پارافین‌واکس خالص افزایش پیدا کرده است.

جدول (۴): مقادیر میانگین و انحراف معیار گرمای نهان نانوکامپوزیت بر حسب (KJ/Kg)

غلظت نانوذره	متغیر	گرمای نهان با نانوذره Al_2O_3	گرمای نهان با نانوذره Cu	
۱٪ غلظت	میانگین	۲۴۶/۰۶	۲۴۶/۹۴	
	انحراف معیار	۱/۷۸	۰/۴۰	
	۷۰	میانگین	۲۴۲/۳۳	۲۴۵/۰۱
		انحراف معیار	۱/۱۹	۰/۹۸
	۱۱۰	میانگین	۲۴۰/۷۷	۲۴۲/۰۳
		انحراف معیار	۰/۳۸	۰/۸۹
۳٪ غلظت	میانگین	۲۴۳/۰۵	۲۴۴/۶۶	
	انحراف معیار	۲/۵۹	۲/۲۵	
	۳۰	میانگین	۲۳۸/۹۴	۲۳۸/۵۴
		انحراف معیار	۱/۰۲	۰/۹۸
	۷۰	میانگین	۲۳۷/۳۶	۲۳۵/۵۸
		انحراف معیار	۲/۶۰	۰/۷۹
۱۱۰	میانگین	۲۲۹/۸۲	۲۳۷/۳۳	
	انحراف معیار	۰/۷۲	۲/۶۴	
۶٪ غلظت	میانگین	۲۳۵/۳۷	۲۳۷/۱۵	
	انحراف معیار	۴/۴۶	۱/۹۵	
	۳۰	میانگین	۲۱۹/۵۸	۲۲۰/۹۵
		انحراف معیار	۱/۹۴	۱/۵۹
	۷۰	میانگین	۲۱۵/۰۹	۲۱۲/۲۵
		انحراف معیار	۱/۵۵	۱/۸۶
۱۱۰	میانگین	۲۰۹/۵۱	۲۱۲/۰۸	
	انحراف معیار	۱/۹۷	۱/۸۶	
هر سه	میانگین	۲۱۴/۷۲	۲۱۵/۰۹	
	انحراف معیار	۴/۶۵	۴/۶۵	

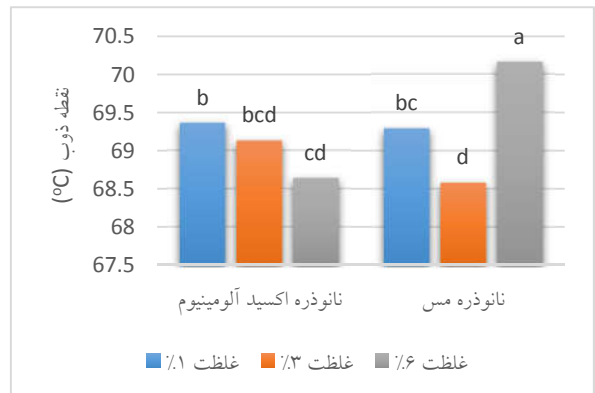
همچنین اثر متقابل نوع نانوذره و غلظت آن نیز در سطح ۱٪ بر نقطه ذوب نانوکامپوزیت معنی‌دار است؛ این بدان معنی است که میزان تغییرات نقطه ذوب در انواع مختلف تحت تأثیر غلظت نانوذره قرار گرفته است. همچنین اثر متقابل سه‌گانه هر سه پارامتر بر روی نقطه ذوب در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است.

جدول (۳): نتایج تجزیه واریانس تأثیر متغیرها بر نقطه ذوب نانوکامپوزیت

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
نوع نانوذره (A)	۱	۱/۲۱۸	۳/۳۵۹ ^{ns}
غلظت (B)	۲	۳/۱۱۷	۴/۲۹۸*
اندازه نانوذره (C)	۲	۲/۱۰۹	۲/۹۰۸ ^{ns}
اثر متقابل AxB	۲	۱۰/۵۱۹	۱۴/۵۰۴**
اثر متقابل AxC	۲	۱/۰۵۴	۱/۴۵۴ ^{ns}
اثر متقابل BxC	۴	۱/۳۱۱	۰/۹۰۴ ^{ns}
اثر متقابل AxBxC	۴	۴/۴۵۵	۳/۰۷۱*
خطا	۳۶	۰/۳۶۳	

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

به علت معنی‌دار شدن اثر متقابل نوع نانوذره در غلظت در سطح ۱٪ بر روی نقطه ذوب به کمک آزمون دانکن، مقایسه میانگین انجام شده است. میانگین‌های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون دانکن دارند.



شکل (۹): مقایسه میانگین نقطه ذوب نانوکامپوزیت

مطابق شکل (۹) فقط در غلظت ۶٪، بین هر دو نانوذره مورد استفاده، از نظر آماری اختلاف معنی‌دار مشاهده می‌شود. همچنین به جز نمونه با غلظت ۶٪ و نانوذره مس، با افزایش غلظت، نقطه ذوب کاهش می‌یابد. دلیل آن افزایش جزء فلزی نسبت به جزء پارافین‌واکس در نانوکامپوزیت است؛ زیرا نانوذرات آمیخته شده در پارافین‌واکس، باعث کاهش مقاومت پارافین‌واکس به تغییر فاز می‌شوند.

۲.۲.۳. تغییرات گرمای نهان

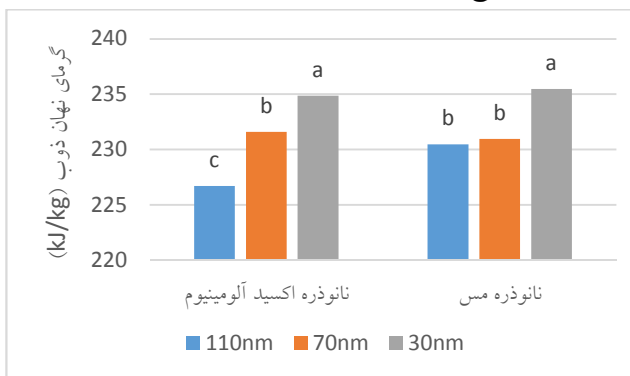
نتایج اندازه‌گیری مقدار میانگین گرمای نهان نانوکامپوزیت با اعمال متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول (۴) ارائه شده است.

نقطه ذوب نانوکامپوزیت معنی دار شده است.

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F
نوع نانوذره (A)	۱	۲۱/۰۶۹	۸/۷۷۲**
غلظت (B)	۲	۸۱۰۹/۳۵	۱۶۸۸**
اندازه نانوذره (C)	۲	۳۹۴/۱۹	۸۲/۰۶**
اثر متقابل A×B	۲	۵/۲۸۳	۱/۱ ^{ns}
اثر متقابل A×C	۲	۴۶/۸۱	۹/۷۴۵**
اثر متقابل B×C	۴	۴۷/۶۶۹	۴/۹۶۲**
اثر متقابل A×B×C	۴	۱۳/۸۶۹	۵/۷۷۵*
خطا	۳۶	۸۶/۴۶۵	

** اثر معنی دار در سطح ۱٪، * اثر معنی دار در سطح ۵٪ و ns اثر معنی دار ندارد.

به علت معنی دار شدن آثار متقابل نوع نانوذره در اندازه آن و غلظت نانوذره در اندازه آن در سطح ۱٪ بر روی گرمای نهان، به کمک آزمون دانکن در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) مقایسه میانگین انجام شده است. میانگین‌های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون اختلاف معنی داری در سطح ۵٪ آزمون دانکن دارند.



شکل (۱۰): مقایسه میانگین گرمای نهان در غیاب غلظت نانوذره

مطابق شکل (۱۰)، با کاهش اندازه نانوذره در هر دو نوع آن، مقدار گرمای نهان افزایش می‌یابد. دلیل احتمالی آن این است که نانوذرات کوچک‌تر، توزیع بهتری در حلال آلی خود دارند؛ زیرا پراکندگی نانوذرات کوچک‌تر در نانوکامپوزیت، یکنواخت‌تر و لایه لایه شدن در آن‌ها کمتر مشاهده می‌شود [۸]. همچنین با افزایش ابعاد و اندازه نانوذرات در نانوکامپوزیت‌ها، احتمال پرکولاسیون (تراوش) و تشکیل شبکه‌ای پرکوله شده از آن‌ها افزایش می‌یابد و گرمای نهان کاهش می‌یابد [۳۲]. در شکل (۲) و شکل (۵) به ترتیب در قیاس با شکل (۴) و شکل (۷) این پدیده به‌وضوح مشاهده می‌شود.

بر اساس شکل (۱۰)، فقط در اندازه ۱۱۰ نانومتر، نانوکامپوزیت‌های حاوی هر دو نانوذره با یکدیگر از نظر آماری تفاوت معنی دار دارند.

$$\Delta U = T\Delta S - P\Delta V \quad (۳)$$

$$\Delta H = \Delta U + V\Delta P \quad (۴)$$

در روابط (۳) و (۴)، ΔU تغییرات انرژی داخلی، ΔS تغییرات آنتروپی، ΔH تغییرات آنتالپی (همگی برحسب ژول)، T دما برحسب کلوین، P فشار برحسب پاسکال و V حجم برحسب مترمکعب می‌باشند. با افزایش درصد ماده افزوده شده به نانوکامپوزیت، دیگر تغییرات حجم قابل صرف نظر نیست و مقدار عبارت $P\Delta V$ افزایش می‌یابد به قسمی که مقدار آن از مقدار عبارت $T\Delta S$ نیز بزرگ‌تر می‌شود و لذا مقدار عبارت ΔU منفی می‌گردد؛ در نهایت طبق رابطه (۴) مقدار آنتالپی کاهش می‌یابد و در نتیجه گرمای نهان نیز کاهش پیدا می‌کند [۱۵].

با توجه به اینکه نانوذرات استفاده شده، فلز و اکسید فلزی هستند، گرمای ویژه خیلی پایین تری نسبت به پارافین واکس و ضریب هدایت حرارتی خیلی بیشتری نسبت به آن دارند. در غلظت ۱٪ که نانوذرات در نانوکامپوزیت با یکدیگر تماس کمتری دارند، بخشی از گرمای لازم برای ذوب پارافین واکس جذب نانوذرات شده و سبب بالا بردن دمای آن‌ها می‌شود؛ بنابراین گرمای نهان نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد. واقع پارافین واکس برای جبران گرمای جذب شده توسط نانوذرات، گرمای بیشتری برای ذوب شدن جذب می‌کند [۳۰].

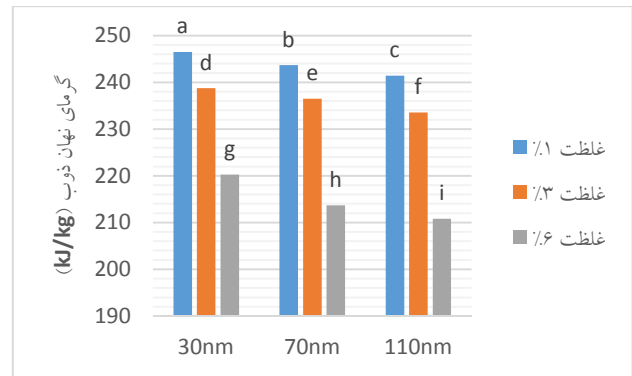
اما در غلظت با درصدهای بیشتر که تماس بین نانوذرات بیشتر است، ضریب هدایت حرارتی در نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد [۳۱] و پارافین واکس به راحتی ذوب می‌شود و گرمای نهان نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد.

جیانگ و همکاران نیز با افزودن نانوذره اکسید آلومینیم به پارافین میکروکپسوله شده، به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت نانوذره، مقدار گرمای نهان کاهش می‌یابد. آن‌ها بیان کردند با افزایش غلظت نانوذره، تراکم و کلوخه شدن نانوذرات رخ می‌دهد که یک پوسته متراکم را تشکیل می‌دهند و این پدیده امکان ذخیره گرمای نهان را کاهش می‌دهد؛ لذا افزودن زیاده از حد مواد نانوساختار به PCM، صحیح نیست [۳۰]. نورانی و همکاران هیچ روند معنی داری را بر اثر افزودن نانوذره به PCM مشاهده نکردند [۲۹].

بر اساس جدول (۵)، با تجزیه واریانس تأثیرات سه فاکتور اصلی نوع، اندازه و غلظت نانوذره بر گرمای نهان نانوکامپوزیت بررسی شد. از جدول (۵)، این نتیجه حاصل می‌شود که اثر هر سه فاکتور نوع، غلظت و اندازه نانوذره و همچنین آثار متقابل نوع نانوذره و اندازه آن، غلظت نانوذره و اندازه آن در سطح ۱٪ بر گرمای نهان نانوکامپوزیت معنی دار است. اثر متقابل سه گانه هر سه پارامتر مورد بررسی نیز در سطح ۵٪ بر

کاهش می‌یابد که این مسئله ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را بهبود می‌بخشد. همچنین نقطه ذوب PCM حاوی نانوذره مس تفاوت چندانی با PCM حاوی نانوذره اکسید آلومینیوم ندارد و روند منطقی‌ای در تغییرات نقطه ذوب با عامل اندازه نانوذره مشاهده نشد.

با افزایش غلظت نانوذره، گرمای نهان برای نانوکامپوزیت با هر دو نوع نانوذره مورد استفاده کاهش می‌یابد. از طرفی با کاهش اندازه نانوذره در هر دو نوع آن، مقدار گرمای نهان افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت برای دستیابی به گرمای نهان بیشتر، بایستی نانوذرات با اندازه بزرگ‌تر و غلظت کمتر انتخاب کرد. استفاده از نانوذره مس با غلظت ۱٪ و اندازه ۳۰ نانومتر مؤثرترین تیمار در ارتقای گرمای نهان PCM بوده است. از آنجا که مقادیر گرمای نهان نانوکامپوزیت ارتقا داده شده با مس به مراتب بزرگ‌تر از مورد مشابه با اکسید آلومینیوم است، می‌توان نتیجه گرفت که این نانوذره برای بهبود خواص ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در PCM مؤثرتر است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای افزایش بهره‌وری سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده می‌کنند مثل جمع‌کننده‌های خورشیدی به کار رود. همچنین برای افزایش بازده سامانه‌های آسایش گرمایی ساختمان‌ها، مدیریت گرمایی در قطعات الکترونیکی و خنک نگه داشتن مواد غذایی در حمل‌ونقل نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد.



شکل (۱۱): مقایسه میانگین گرمای نهان در غیاب نوع نانوذره

مطابق شکل (۱۱)، با افزایش غلظت در هرکدام از اندازه‌ها، مقدار گرمای نهان کاهش می‌یابد؛ که پیش‌تر دلیل این پدیده بیان شد. در هر سه غلظت و در هر سه اندازه مورد بررسی، نمونه‌ها با یکدیگر از نظر آماری اختلاف معنی‌دار دارند.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس بر برخی خواص حرارتی PCM شامل گرمای نهان و نقطه ذوب در حضور سازگارکننده اسید اولئیک بررسی شد. برای بررسی درستی اندازه و غلظت نانوذرات آمیخته‌شده در نانوکامپوزیت از آزمون FESEM بهره گرفته شد و اندازه و غلظتی که انتظار می‌رفت تأیید گردید. نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت نانوذره، نقطه ذوب اندکی

مراجع

- [1] بنایی، محمدرضا، اژدرفاقی‌بناب، حسین، «ارائه یک مبدل غیر ایزوله DC-DC با ضریب افزایش‌دهی بالا برای کاربرد در انرژی خورشیدی» نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره هفتم، شماره اول، صفحه ۱۴-۲۹، ۱۳۹۶.
- [2] Demirbas, M. F., "Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: an Overview", Energy Sources, Part B Econ. Planning, Policy, Vol. 1, No. 1, pp. 85–95, 2006.
- [3] Elgafy, A. and Lafdi, K., "Effect of Carbon Nanofiber Additives on Thermal Behavior of Phase Change Materials", Carbon N. Y., Vol. 43, No. 15, pp. 3067–3074, 2005.
- [4] Yu, W. and Xie, H., "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications", J. Nanomater., Vol. 2012, p. 1, 2012.
- [5] Halté, V., Bigot, J.-Y., Palpant, B., Broyer, M., Prével, B. and Pérez, A., "Size Dependence of the Energy Relaxation in Silver Nanoparticles Embedded in Dielectric Matrices", Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 24, pp. 3799–3801, 1999.
- [6] Narayanan S. S. and et al., "Development of sunlight-driven eutectic phase change material nanocomposite for applications in solar water heating", Resour. Technol., Vol. 3, No. 3, pp. 272–279, 2017.
- [7] Tasnim, S. H., Hossain, R., Mahmud, S. and Dutta, A. "Convection effect on the melting process of nano-PCM inside porous enclosure", Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 85, pp. 206–220, Jun. 2015.
- [8] Wang, J. Xie, H. and Xin, Z. "Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes", Thermochim. Acta, Vol. 488, No. 1–2, pp. 39–42, 2009.
- [9] Colla, L., Fedele, L., Mancin, S., Danza, L. and Manca, O., "Nano-PCMs for enhanced energy storage and passive cooling applications", Appl. Therm. Eng., Vol. 110, pp.

- 584–589, 2017.
- [10] Wu, S., Wang, H., Xiao, S. and Zhu, D., "Numerical simulation on thermal energy storage behavior of Cu/paraffin nanofluids PCMs", *Procedia Eng.*, Vol. 31, pp. 240–244, 2012.
- [11] Li, M., "A nano-graphite / paraffin phase change material with high thermal conductivity", *Appl. Energy*, Vol. 106, pp. 25–30, 2013.
- [۱۲] نظیفی فرد، محمد، عباسیان آرانی، علی اکبر، کلباسی، محمدحسین، «بررسی فرایند ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده پارافین واکس در یک هندسه کروی»، سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران، بابل، ۱۳۹۶.
- [13] Li, T., Lee, M., Wang, J.-H. R. and Kang, Y. T., "Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 75, pp. 1–11, 2014.
- [14] Warzoha, R. J., Weigand, R. M. and Fleischer, A. S., "Temperature-dependent thermal properties of a paraffin phase change material embedded with herringbone style graphite nanofibers", *Appl. Energy*, Vol. 137, pp. 716–725, 2015.
- [15] Yang, Y., Luo, J., Song, G., Liu, Y. and Tang, G., "The experimental exploration of nano-Si₃N₄/paraffin on thermal behavior of phase change materials", *Thermochim. Acta*, Vol. 597, pp. 101–106, 2014.
- [16] Motahar, S., Nikkam, N., Alemrajabi, A. A., Khodabandeh, R., Toprak, M. S. and Muhammed, M., "Experimental investigation on thermal and rheological properties of n-octadecane with dispersed TiO₂ nanoparticles", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 59, pp. 68–74, 2014.
- [17] Colla, L., Fedele, L., Mancin, S., Danza, L. and Manca, O., "Nano-PCMs for enhanced energy storage and passive cooling applications", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 110, pp. 584–589, 2017.
- [18] OBITAYO, O. A., "Simulation and analysis of phase change materials for building temperature control", *Univ. Strat. Glas. United Kingdom*, 2011.
- [19] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D., "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renew. Sustain. energy Rev.*, Vol. 13, No. 2, pp. 318–345, 2009.
- [20] Kousksou, T., El Rhafiki, T., Mahdaoui, M., Bruel, P. and Zeraouli, Y., "Crystallization of supercooled PCMs inside emulsions: DSC applications", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 107, pp. 28–36, 2012.
- [21] Watson, E. S., O'Neill, M. J., Justin, J. and Brenner, N., "A Differential Scanning Calorimeter for Quantitative Differential Thermal Analysis", *Anal. Chem.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1233–1238, Jun. 1964.
- [22] Lin S. C. and Al-Kayiem, H. H., "Evaluation of copper nanoparticles-Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage", *Sol. Energy*, Vol. 132, pp. 267–278, 2016.
- [23] Nurten, Ş., Fois, M. and Paksoy, H., "Solar Energy Materials & Solar Cells Improving thermal conductivity phase change materials — A study of paraffin nanomagnetite composites", Vol. 137, pp. 61–67, 2015.
- [24] Yu, Z.-T. and et al., "Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes", *Carbon N. Y.*, Vol. 53, pp. 277–285, 2013.
- [۲۵] سازمان ملی استاندارد ایران، استاندارد شماره ۱-۷۱۸۶، گرماسنج روبشی تفاضلی، ایران، چاپ اول، ۱۳۹۴، صفحه ۱-۴۷.
- [26] Şahan, N., Fois, M. and Paksoy, H., "Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 137, pp. 61–67, 2015.
- [27] Shaikh, S., Lafdi, K. and Hallinan, K., "Carbon nanoadditives to enhance latent energy storage of phase change materials", *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, No. 9, p. 94302, 2008.
- [28] Li, M., "A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity", *Appl. Energy*, Vol. 106, pp. 25–30, 2013.
- [29] Nourani, M., Hamdami, N., Keramat, J., Moheb, A. and Shahedi, M., "Thermal behavior of paraffin-nano-Al₂O₃ stabilized by sodium stearyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity", *Renew. Energy*, Vol. 88, pp. 474–482, 2016.
- [30] Jiang, X., Luo, R., Peng, F., Fang, Y., Akiyama, T. and Wang, S., "Synthesis, characterization and thermal properties of paraffin microcapsules modified with nano-Al₂O₃", *Appl. Energy*, Vol. 137, pp. 731–737, 2015.
- [31] Oya, T., Nomura, T., Tsubota, M., Okinaka, N. and Akiyama, T., "Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles",

Appl. Therm. Eng., Vol. 61, No. 2, pp. 825–828, 2013.

materials using nanographite additives", Carbon N. Y., Vol.

[32] Shi, J.-N. and et al., "Improving the thermal conductivity and shape-stabilization of phase change

51, pp. 365–372, 2013.