

بهبود فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از نانوذرات مغناطیسی تحت میدان

مغناطیسی

شاهین فقیری
تهران، دانشگاه صنعتی شریف
shahinfaghi74@gmail.com

امید محمدی
تهران، دانشگاه صنعتی شریف
omidmohmm@gmail.com

محمد بهشاد شفیعی*
تهران، دانشگاه صنعتی شریف
behshad@sharif.edu

حسین حسینی نوه
تهران، دانشگاه صنعتی شریف
hosseinhosseini3717@gmail.com

چکیده

رسانش حرارتی پایین مواد تغییر فاز دهنده منجر به طولانی شدن فرایندهای ذوب و انجماد (شارژ و دشارژ) در این مواد شده است. این مشکل کاربرد این مواد را در زمینه ذخیره‌سازی انرژی با محدودیت‌هایی مواجه کرده است. در پژوهش حاضر تاثیر افزودن نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی بر سرعت و نحوه تغییر فاز پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده بصورت تجربی بررسی می‌گردد. بدین منظور از یک محفظه مکعب جهت ذوب ماده تغییر فاز دهنده استفاده گردید که دیواره سمت چپ آن شار حرارتی ثابت را اعمال می‌کرد. از یک آهنربای ثابت به منظور اعمال میدان مغناطیسی ثابت افقی به قدرت ۰٫۲ تسلا استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات با غلظت ۱٪ جرمی کاهش دما در راستای افق و نیز کاهش زمان ذوب را در پی دارد. از طرفی افزودن نانوذرات رسانش حرارتی پارافین را ۵٪ افزایش داد. همچنین میدان مغناطیسی منجر به کاهش زمان ذوب و انتقال حرارت بهتر در پارافین گردید. با استفاده از نانوذرات مغناطیسی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، زمان ذوب به ترتیب ۱۲٪ و ۸٪ کاهش یافت.

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، رسانش حرارتی، نانوذرات مغناطیسی، میدان مغناطیسی

۱- مقدمه

امروزه با توجه به کمبود منابع انرژی فسیلی و مشکل آلودگی هوای ناشی از مصرف این سوخت‌ها برای تامین انرژی، استفاده از انرژی‌های جایگزین اهمیت بیشتری پیدا کرده‌است. لذا انرژی‌های نو شامل خورشیدی، باد، زمین گرمایی، انرژی هسته‌ای و ... در حال گسترش روزافزون است. انرژی‌های تجدیدپذیر اکثراً حالت متناوب داشته و در برخی بازه‌های زمانی در دسترس نیستند، لذا با توجه به این مسئله، ذخیره‌ی انرژی‌های الکتریکی، گرمایی و ... اهمیت زیادی پیدا می‌کند. یکی از راه‌های موثر در ذخیره‌ی انرژی گرمایی^۱ استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۲ می‌باشد. عملکرد این مواد به گونه‌ای است که با تغییر فاز در دمای ثابت، مقدار زیادی انرژی آزاد یا جذب می‌کنند. در دهه‌های گذشته قابلیت این مواد در زمینه‌ی ذخیره‌سازی انرژی در دمای ثابت موجب شده‌است در صنایع مختلفی مانند نیروگاه‌های خورشیدی [۱]، ساختمان‌ها [۲]، منسوجات [۳]، قطعات الکترونیکی [۴]، اتومبیل‌ها [۵]، فضاپیماها [۶] و ... استفاده شود.

¹ Thermal Energy Storage (TES)

² Phase Change Material (PCM)

با وجود تمامی مزیت‌هایی که ذکر شد، مواد تغییر فاز دهنده دارای یک نقطه ضعف اساسی هستند. رسانش حرارتی پایین سبب محدودیت استفاده از این مواد در برخی از موارد شده‌است. رسانش حرارتی پایین مواد تغییر فاز دهنده باعث می‌شود تا فرآیند ذوب و انجماد مدت زمان زیادی طول بکشد. برای افزایش رسانندگی حرارتی این مواد پژوهش‌های زیادی انجام شده‌است. این تحقیقات را می‌توان به دو دسته تغییرات در ساختار و تغییرات در ماده تغییر فاز دهنده تقسیم بندی نمود. در دسته‌ی اول محققان با تغییرات ساختاری ماده‌ی تغییر فاز دهنده به دنبال تسریع فرآیند شارژ و دشارژ ماده‌ی تغییر فاز دهنده بوده‌اند. بسیاری از محققان برای این منظور از پره‌ها استفاده کرده‌اند. لمبرگ^۳ یک مدل تحلیلی ساده شده ارائه کرد که موقعیت سطح سیال-جامد و توزیع دمای فین را در فرآیند انجماد درون یک محفظه PCM تحت شرایط دمای دیواره انتهایی ثابت نشان می‌دهد. او میزان PCM جامد شده را برای زمان‌ها و موقعیت‌های مختلف پره مورد بررسی قرار داد تا بهترین هندسه را تعیین کند [۷]. سیاکاولی^۴ استفاده از فین‌های درختی شکل را به منظور ارتقای عملکرد LHTES ها پیشنهاد کرد. او از CFD برای شبیه‌سازی این فین‌ها استفاده کرد. بر اساس نتایج سیاکاولی بیش از ۲۴ درصد بهبود عملکرد در حالت بهینه وجود داشت [۸]. گروهی دیگر از محققان نیز از محیط متخلخل به منظور تغییر در ساختار ماده‌ی تغییر فاز دهنده استفاده کرده‌اند. مسالهی^۵ رسانش گرمایی PCM ها در محیط متخلخل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار داد. این تحقیق بیانگر آن بود که استفاده از محیط متخلخل تاثیر زیادی روی انتقال حرارت و ذوب PCM دارد. از طرف دیگر کاهش تخلخل محیط نرخ ذوب را کاهش داده و حرکت سیال را مختل می‌کند. او بهترین راه برای بهبود رسانش گرمایی را استفاده از محیط فلزی با رسانش و تخلخل بالا پیشنهاد کرد [۹].

در دسته‌ی دیگر پژوهشگران با افزودن موادی که دارای رسانش بالاتری نسبت به مواد تغییر فاز دهنده هستند، به دنبال بهبود رسانش گرمایی این مواد می‌باشند. استفاده از نانو ذرات و پخش آن در سیال پایه از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده برای بهبود رسانندگی این مواد می‌باشد. اما باید توجه داشت اضافه کردن نانو ذرات باعث افزایش لزجت سیال می‌شود که خود پارامتری منفی می‌باشد، پس انتظار می‌رود حالت بهینه‌ای وجود داشته باشد. هو^۶ و همکاران مشخصات ترموفیزیکی موثر پارافین حاوی نانوذرات Al_2O_3 را مطالعه کردند. پخش نانوذرات باعث شد تا رسانش گرمایی پارافین بصورت غیرخطی با درصد جرمی نانوذرات افزایش یابد. از طرفی افزایش درصد جرمی افزایش لزجت نانو ذرات را به همراه داشت. او همچنین بیان کرد که لزجت و رسانش حرارتی به دما نیز بستگی دارد [۱۰]. ساهان^۷ به صورت تجربی تاثیر نانو ذرات مغناطیسی را بر رسانش حرارتی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده بررسی کرد. او مشاهده کرد که با افزایش درصد نانوذرات رسانش حرارتی پارافین افزایش می‌یابد. با توجه به بالاتر بودن رسانش گرمایی نانوذرات مغناطیسی به میزان ۵۰ برابر بیشتر از پارافین خالص، رسانش گرمایی پارافین حاوی نانوذرات بسیار بیشتر از پارافین خالص بود [۱۱]. نورانی^۸ با افزودن نانوذرات Al_2O_3 به همراه سورفکتانت SSL در پایه پارافین رسانش حرارتی پارافین را افزایش داد. میزان بهبود رسانش گرمایی پارافین حاوی نانوذرات حاوی ۱۰٪ نانوذرات به ترتیب ۳۱٪ و ۱۳٪ در حالت‌های جامد و مایع بود [۱۲].

همانگونه که عنوان گردید تاکنون نانوذرات مختلفی به منظور بهبود زمان شارژ مواد تغییر فاز دهنده استفاده گردیده‌اند. اما تاکنون تاثیر نانوذرات مغناطیسی (Fe_3O_4) و میدان مغناطیسی بررسی نگردیده است. در این پژوهش از نانوذرات مغناطیسی (Fe_3O_4) و میدان مغناطیسی به منظور بهبود نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود. بدین منظور پس از تهیه نانوذرات مغناطیسی و پخش آن در پارافین به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده با غلظت ۱٪ جرمی دو حالت حضور میدان و عدم حضور آن بررسی گردید و با پارافین خالص مقایسه گردید. لازم به ذکر است بدین منظور از یک محفظه با شار حرارتی ثابت از دیواره سمت چپ استفاده گردید.

³ lamberg

⁴ Sciacovelly

⁵ Mesalhy

⁶ Ho

⁷ sahan

⁸ Nourani

۲- بخش آزمایشگاهی

۲-۱- آماده سازی نانوذرات

نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از نمک‌های هیدرات Fe^{+2} و Fe^{+3} با استفاده از روش سل-ژل سنتز گردید. همچنین از حلال‌های ۵۰ میلی‌لیتر HCl (۳۶،۵-۳۸٪، مرک^۹) دو مولار و ۵۵ میلی‌لیتر NH_4OH (۲۸-۳۰٪، مرک^{۱۰}) استفاده گردید. در ابتدا ۲ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (سیگما الدریج^{۱۱}) در ۴۰ میلی‌لیتر HCl دو مولار و نیز ۱،۲۵ گرم $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ (سیگما الدریج^{۱۲}) در ۱۰ میلی‌لیتر HCl دو مولار بصورت جداگانه حل شد. سپس این دو محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ۱۲۰۰ دور بر دقیقه با هم ترکیب شدند. ۵۵ میلی‌لیتر محلول ۵ مولار NH_4OH به مدت ۵ دقیقه بصورت قطره به قطره به محلول اضافه شد و در این مرحله نانوذرات سیاه رنگ شروع به تشکیل شدن کرد و این نانوذرات توسط آهنربا از محلول جدا گردید.

اصلاح سطح نانوذرات مرحله بعد آماده سازی نانوذرات است. لذا pH نانوذرات با افزودن NH_4OH ۵ مولار در ۹،۵ تنظیم شد و در مرحله بعد محلول oleic acid-dichloromethane با درصد حجمی ۱٪ اضافه گردید. در انتها pH با افزودن HCl یک مولار به عدد ۷ افزایش داده شد. سپس محلول به دو فاز آب دوست و آب گریز تبدیل شد. نانوذرات اصلاح شده با oleic acid در فاز آب گریز باقی ماند و فاز آب دوست خارج گردید. سپس فاز آب گریز با آب دیونیزه شسته شد و در نهایت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید.

پس از ذوب کردن پارافین (مرک، کد ۶۱۷۸۲۳۰۵۰۰۱۷۳۰) با دمای ذوب ۶۰ درجه و افزودن نانوذرات با غلظت ۱٪ جرمی، محلول ابتدا توسط همزن مکانیکی به مدت نیم ساعت هم‌زده شد و سپس در دستگاه التراسونیک حمام آب با دمای آب ۷۰ درجه به مدت ۲ ساعت قرار گرفت تا نانوذرات به خوبی در پارافین پخش و پایدار گردند.

۲-۲- ساخت دستگاه آزمایشی

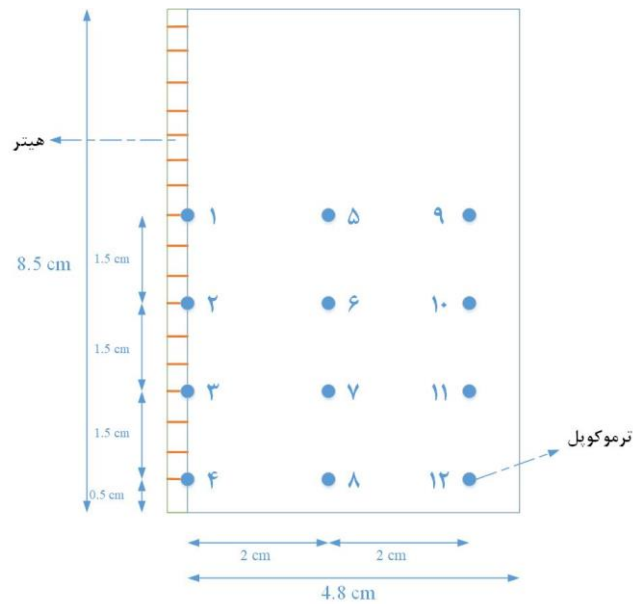
به منظور ساخت محفظه از پلکسی گلس با ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده گردید. ابعاد محفظه ساخته شده $25 \times 48 \times 85$ سانتی‌متر بود که وجه 48×85 وجه جلویی محفظه بود. وجه‌های مختلف محفظه با استفاده از کلروفوم به یکدیگر متصل گردید. در دیواره سمت چپ نیز از یک هیتر صفحه‌ای به منظور اعمال شار حرارتی استفاده گردید. از عایق الاستومری با ضخامت ۱ سانتی‌متر هم به منظور عایق سازی محفظه و جلوگیری از اتلافات حرارتی استفاده گردید. از طرفی به منظور بررسی خط ذوب ماده تغییر فاز دهنده از محفظه تصویربرداری گردید. لذا وجه جلویی عایق قابل جدا شدن بود تا هر نیم ساعت یکبار جدا شده و تصویربرداری با استفاده از یک دوربین Nikon1 J4 انجام گردد. ۱۲ عدد ترموکوپل نوع K نیز در نقاط نشان داده شده تعبیه گردید تا دمای سیستم را اندازه گیری نموده و با استفاده از یک داده بردار مدل SD 4208 آن را ثبت کند. اعمال توان حرارتی به هیتر نیز از طریق یک منبع تغذیه DC انجام گردید. شکل ۱ شماتیک دستگاه را نشان می‌دهد.

⁹ Merck

¹⁰ Merck

¹¹ Sigma Aldrich

¹² Sigma Aldrich

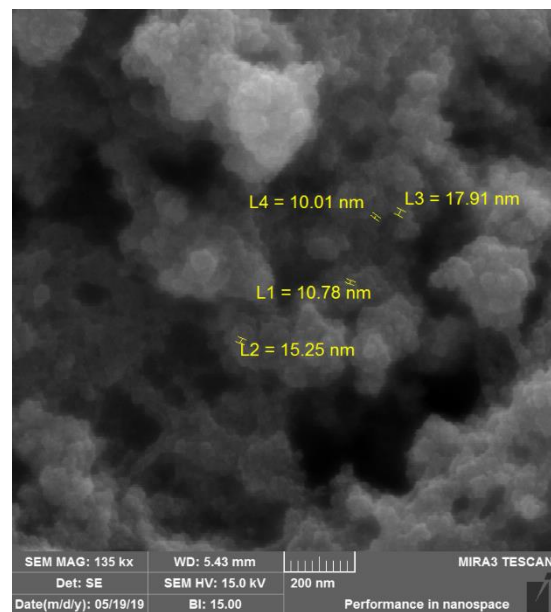
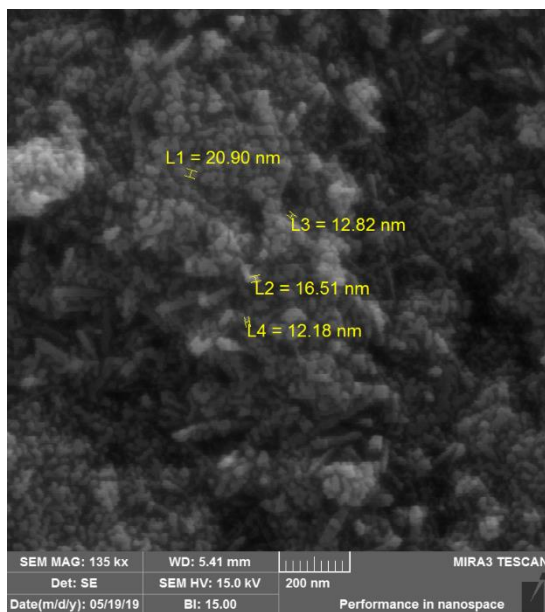


شکل ۱: شماتیک محفظه ساخته شده

به منظور انجام آزمایشات با اتصال توان حرارتی ورودی ۶ وات به هیتر دماها با فرکانس ۰٫۵ هرتز ثابت گردید. هر نیم ساعت یکبار نیز وجه جلویی عایق برداشته شد تا از محفظه و نحوه ذوب عکس گرفته شود. همچنین مدت زمان تغییر فاز کل پارافین ثبت می‌گردد. تاثیر میدان نیز با قرار دادن یک آهنربای ثابت با قدرت ۰٫۲ تسلا بر روی جداره هیتر بررسی گردید.

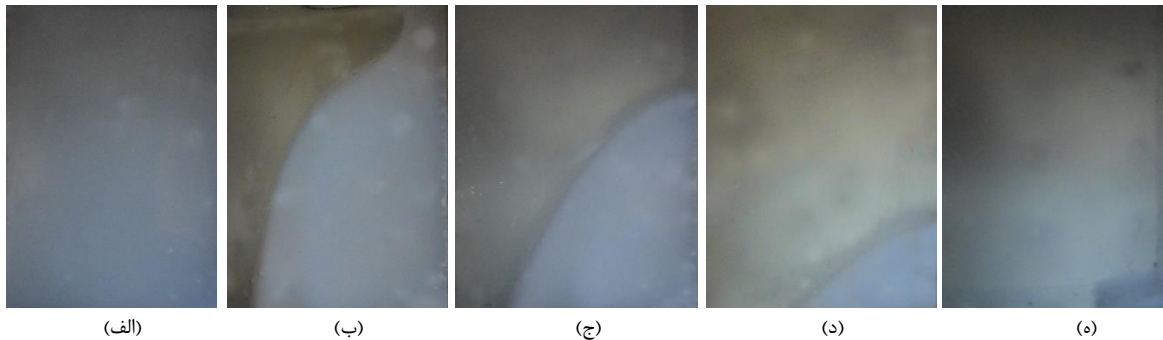
۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی تشکیل مناسب نانوذرات و اندازه آن‌ها از آنالیز SEM استفاده گردید. نمودارهای SEM نانوذرات تشکیل شده با مقیاس‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. ساختارهای کروی قابل مشاهده در شکل بیانگر این است که نانوذرات کروی به خوبی تشکیل شده و ابعاد آن‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر است.



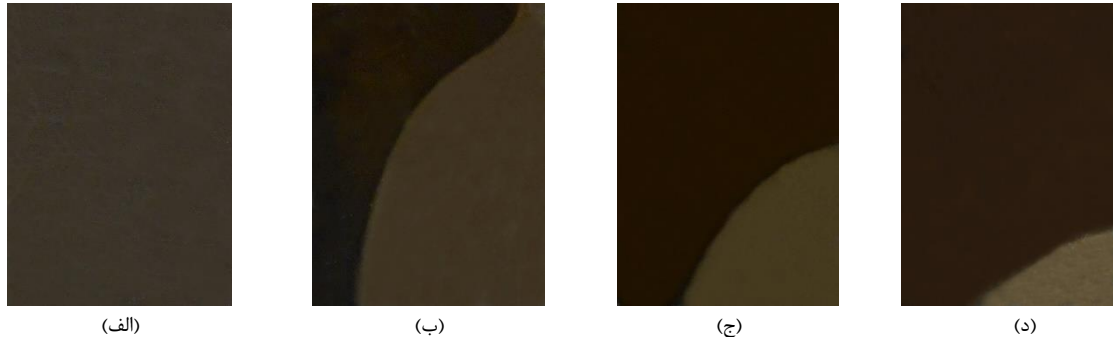
شکل ۲: تصاویر SEM نانوذرات Fe_3O_4

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر نانوذرات و میدان مغناطیسی، پروفیل دما پس از گذشت یک و دو ساعت، خط ذوب در زمان‌های مختلف و نیز زمان ذوب بودند. شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب نحوه ذوب پارافین خالص، پارافین حاوی نانوذرات در عدم حضور میدان و پارافین حاوی نانوذرات در حضور میدان را برای زمان‌های مختلف نشان می‌دهند.



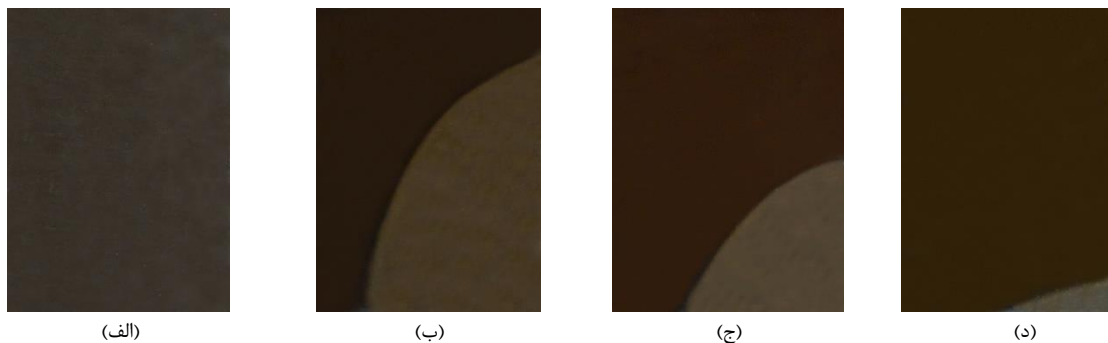
شکل ۳: نحوه ذوب پارافین خالص در زمان‌های الف) ۰ دقیقه ب) ۶۰ دقیقه ج) ۹۰ دقیقه د) ۱۲۰ دقیقه ه) ۱۵۰ دقیقه

همانطور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود با توجه به شار منتقلی به پارافین این ماده از سمت چپ شروع به تغییر فاز می‌کند. همچنین از آنجا که انتقال حرارت در قسمت مایع شامل رسانش حرارتی و جابجایی آزاد است، خط ذوب دارای انحنا است. این انحنا به نحوی است که در بالای محفظه مقدار بیشتری از جامد ذوب شده است. دلیل این مشاهده بالاتر بودن دمای بالای محفظه بعلت نیروی شناوری و جابجایی آزاد است. در واقع چنانچه انتقال حرارت تنها از نوع رسانش حرارتی باشد، انتظار می‌رود خط ذوب صاف‌تر و بصورت عمودی باشد. آخرین بخشی از پارافین که جامد می‌شود نیز دورترین فاصله از هیتر و پایین محفظه است. در این حالت کل پارافین در ۱۶۰ دقیقه ذوب گردید.



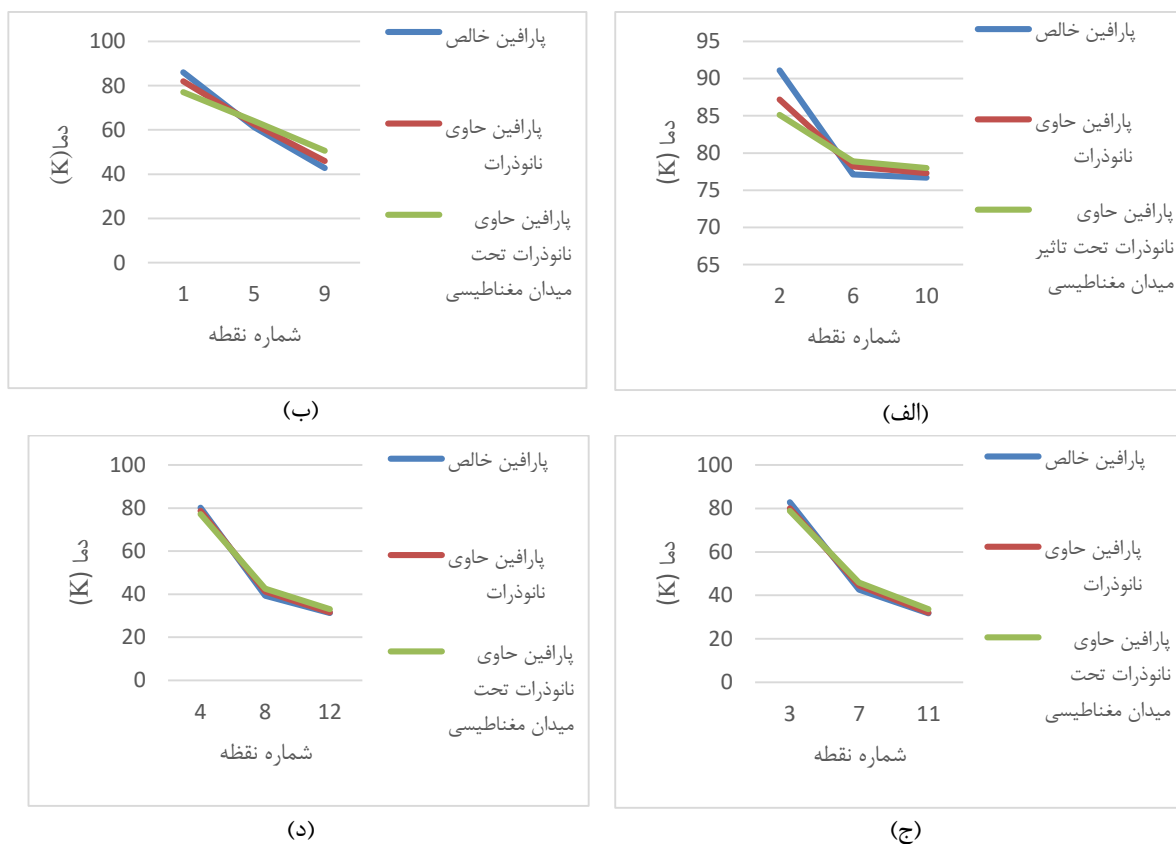
شکل ۴: نحوه ذوب پارافین حاوی نانوذرات مغناطیسی در عدم حضور میدان مغناطیسی در زمان‌های الف) ۰ دقیقه ب) ۶۰ دقیقه ج) ۹۰ دقیقه د) ۱۲۰ دقیقه

شکل ۴ بیانگر این است که افزودن نانوذرات با غلظت ۱٪ جرمی باعث می‌شود تا در زمان‌های یکسان خط ذوب رشد بیشتری داشته باشد. در واقع با توجه به رسانش حرارتی بالاتر نانوذرات مغناطیسی نسبت به پارافین خالص، حضور این مواد در پارافین رسانش حرارتی آن را افزایش می‌دهد. افزایش پارامتر انتقال حرارت را افزایش داده و سبب می‌شود گرما راحت‌تر در پارافین منتقل شود، لذا از افزایش دمای سمت چپ محفظه کاسته شده و دمای سمت راست محفظه (دور از هیتر) نیز افزایش بیشتری می‌یابد و زودتر به دمای ذوب (۶۰ درجه) می‌رسد. در این حالت کل پارافین در مدت زمان ۱۴۶ دقیقه ذوب گردید که نسبت به حالت پارافین خالص ۸٪ بهبود داشت. ضریب رسانش پارافین و نیز پارافین حاوی غلظت ۱٪ جرمی نانوذرات با استفاده از دستگاه KD2 Pro اندازه‌گیری شد. این مقادیر به ترتیب ۰,۲۳۴ و ۰,۲۴۶ W/mK بود که بیانگر افزایش ۵٪ رسانش حرارتی بود.



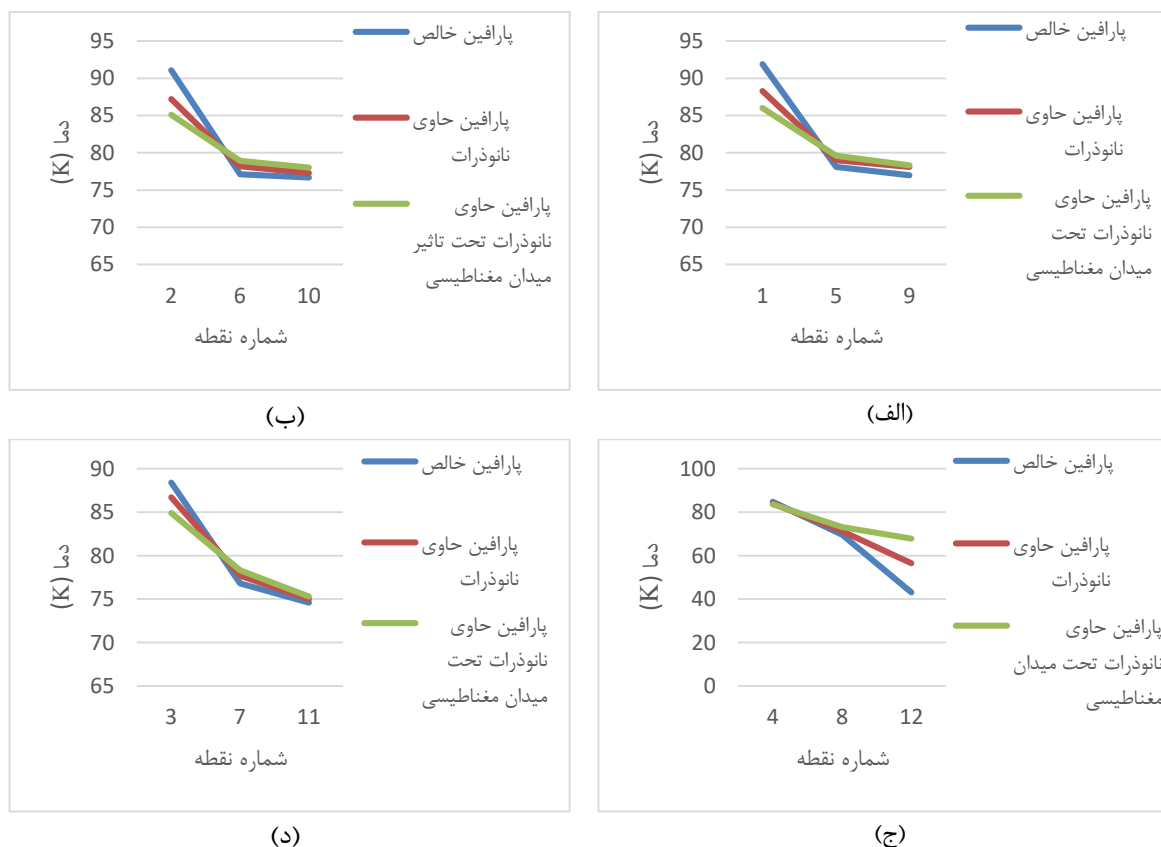
شکل ۵: نحوه ذوب پارافین حاوی نانوذرات مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی در زمان‌های (الف) ۰ دقیقه (ب) ۶۰ دقیقه (ج) ۹۰ دقیقه (د) ۱۲۰ دقیقه (ه) ۱۵۰ دقیقه

همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود اعمال میدان مغناطیسی رشد بیشتر خط ذوب را به همراه داشته و در نتیجه زمان ذوب را کاهش می‌دهد. مدت زمان لازم برای ذوب کل پارافین در این حالت ۱۴۱ دقیقه بود که نسبت به پارافین خالص ۱۲٪ کاهش داشت. نکته‌ای که باید بدان توجه کرد این است که اعمال میدان انتقال حرارت بهتری از حالت عدم حضور میدان دارد. این انتقال حرارت بهتر را می‌توان به افزایش رسانش حرارتی ناشی از قرار گرفتن نانوذرات مغناطیسی در حضور میدان و همچنین افزایش جابجایی آزاد نسبت داد. پروفیل دمای هر یک از سطوح ترموکوپل‌ها که به ترتیب شامل سطوح ۹-۵-۱، ۱۰-۶-۲، ۱۱-۷-۳ و ۱۲-۸-۴ هستند پس از گذشت ۶۰ دقیقه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نحوه تغییرات دما در راستای افق در هریک از سطوح در زمان ۶۰ دقیقه برای هر سه حالت

شکل ۶ نشان می‌دهد که در هر ارتفاع شیب تغییرات دما با فاصله گرفتن از هیتر کاهش می‌یابد که علت آن کاهش جابجایی آزاد با افزایش فاصله از هیتر است. همچنین در هر ردیف از ترموکوپل‌ها و عبارتی در هر ارتفاع مشخص، افزودن نانوذرات و نیز اعمال میدان مغناطیسی منجر به کاهش شیب دما می‌شود. این کاهش شیب بدان معناست که میزان شار حرارتی کمتری صرف بالارفتن دمای قسمت‌های نزدیک به هیتر شده و مقدار شار بیشتری به قسمت‌های دور از هیتر می‌رسد. در نتیجه همانطور که از شکل ۵ قسمت‌های الف تا د قابل مشاهده است دمای سطح هیتر در حالت استفاده از نانوذرات در حضور و نیز عدم حضور میدان نسبت به پارافین خالص کمتر است. در حالت پارافین حاوی نانوذرات در عدم حضور میدان، کاهش شیب و در نتیجه تسریع فرایند ذوب ناشی از افزایش رسانش حرارتی ناشی از وجود نانوذرات است. این در حالی است که در حالت پارافین حاوی نانوذرات در حضور میدان، کاهش شیب دمایی و نیز تسریع فرایند ذوب را می‌توان به افزایش رسانش حرارتی ناشی از وجود نانوذرات و نیز افزایش رسانش حرارتی و جابجایی آزاد ناشی از میدان مغناطیسی نسبت داد. لازم به ذکر است که رسیدن به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به معنای ذوب پارافین است. شکل ۷ نحوه تغییرات دما را در ردیف‌های مختلف ترموکوپل‌ها پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۷: نحوه تغییرات دما در راستای افق در هریک از سطرها در زمان ۱۲۰ دقیقه برای هر سه حالت

شکل ۷ بیانگر این است که نانوذرات و نیز میدان مغناطیسی شیب تغییرات دما را کاهش داده و منجر به افزایش دمای نقاط با فاصله دور از هیتر می‌شوند. همانطور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود با گذر زمان تعداد ترموکوپل‌هایی که به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب) رسیده‌اند بیشتر می‌شود. همچنین حضور میدان نیز انتقال حرارت را بهبود داده و شیب تغییرات دما را کاهش می‌دهد تا دمای نقاط نزدیک به هیتر افزایش کمتری داشته و نقاط دور از هیتر گرمای بیشتری دریافت کنند. در واقع عملکرد بهتر انتقال گرما در مواد تغییر فاز دهنده منجر می‌شود تا از گرمای محسوس فازهای مایع و جامد استفاده کمتری شود و بیشتر گرما صرف تغییر فاز یا گرمای نهان ماده شود.

در واقع گرمای داده شده به ماده تغییر فاز دهنده به سه صورت زیر در ماده ذخیره می‌شود:

$$(۱) \quad \text{گرمای محسوس بخش مایع} + \text{گرمای محسوس بخش جامد} + \text{گرمای نهان تغییر فاز} = \text{گرمای داده شده}$$

با افزایش رسانش حرارتی و نرخ انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده سهم هر یک از بخش‌های محسوس کاهش یافته و لذا استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به نحو مطلوب انجام می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر استفاده از نانوذرات مغناطیسی در حالت‌های حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی بر سرعت و نحوه ذوب پارافین بصورت تجربی بررسی گردید. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات مغناطیسی با غلظت ۱٪ جرمی افزایش رسانندگی حرارتی به میزان ۵٪ و نیز کاهش شیب دما در راستای افق را به همراه دارد. همچنین بررسی دو حالت حضور و نیز عدم حضور میدان مغناطیسی نشان داد استفاده از میدان مغناطیسی به علت افزایش رسانش حرارتی و جابجایی آزاد در بخش مایع سرعت تغییر فاز را افزایش داده و عملکرد ماده تغییر فاز دهنده را بهبود می‌دهد. بهبود زمان ذوب با استفاده از نانوذرات در حضور و عدم حضور میدان به ترتیب ۱۲٪ و ۸٪ و بود.

تشکر و قدردانی

نویسنده بر خود واجب می‌داند از زحمات آقایان دکتر باقرزاده، دکتر رضایی و دکتر کوهستانیان تشکر و قدردانی کند.

- [1] Faegh, M., Shafii, M. B. (2017). Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. *Desalination*, 409, 128-135.
- [2] Souayfane, F., Fardoun, F., Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and buildings*, 129, 396-431.
- [3] Fallahi, E., Barmar, M., Kish, M. H. (2010). Preparation of phase-change material microcapsules with paraffin or camel fat cores: application to fabrics. *Iran Polym J*, 19(4), 277-286.
- [4] Alawadhi, E. M., Amon, C. H. (2003). PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 116-125.
- [5] Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M. (2012). Application of phase change materials (PCMs) in maintaining comfort temperature inside an automobile. *World Acad Sci Eng Technol Int J Chem Mol Nucl Mater Metall Eng*, 6(1), 33-35.
- [6] Ferreira, A. P., Childers, B., Melhem, R., Mossé, D., Yousif, M. (2010, April). Using PCM in next-generation embedded space applications. In 2010 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (pp. 153-162). IEEE.
- [7] Lamberg, P., Siren, K. (2003). Analytical model for melting in a semi-infinite PCM storage with an internal fin. *Heat and Mass Transfer*, 39(2), 167-176.
- [8] Sciacovelli, A., F. Gagliardi, and V. Verda. "Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins." *Applied Energy* 137 (2015): 707-715.
- [9] Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., Bowman, K. (2005). Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management*, 46(6), 847-867.
- [10] Ho, Ching Jenq, and J. Y. Gao. "Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36, no. 5 (2009): 467-470.
- [11] Sahan, Nurten, and Halime O. Paksoy. "Thermal enhancement of paraffin as a phase change material with nanomagnetite." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 126 (2014): 56-61.
- [12] Nourani, Moloud, Nasser Hamdami, Javad Keramat, Ahmad Moheb, and Mohammad Shahedi. "Thermal behavior of paraffin-nano-Al₂O₃ stabilized by sodium stearyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity." *Renewable Energy* 88 (2016): 474-482.