

بررسی تجربی شارژ پارافین واکس همراه با نانوذرات در یک مبدل حرارتی دو لوله-ای خارج از مرکز برای ذخیره انرژی در یک آبگرمکن خورشیدی

محمد رضا عصارى*، رضا نصیری، احمد علی پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۲ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۵ فروردین ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

ماده تغییر فاز دهنده نانو
فرایند شارژ
مبدل خارج از مرکز
آبگرمکن خورشیدی
ذخیره انرژی

چکیده: کاربرد سیستم ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از گرمای نهان ذوب مواد تغییر فاز دهنده یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد برای ذخیره انرژی در آبگرمکن‌های خورشیدی است. این مقاله مربوط به پژوهشی تجربی است که در هفته اول شهریور سال ۹۳ در دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول انجام شده است. در این پژوهش ابتدا دو مبدل حرارتی دو لوله‌ای خارج از مرکز با خروج از مرکزهای متفاوت ساخته شده است و هر کدام به صورت مجزا در مدار یک سیستم آبگرمکن خورشیدی اجباری (پمپی) قرار گرفته‌اند که این سیستم خود شامل یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت و یک مخزن ذخیره و یک پمپ گردش‌دهنده آب گرم است. از میان لوله داخلی این مبدل، آبی که توسط کلکتور خورشیدی گرم می‌شود عبور می‌کند در حالی که در پوسته این مبدل پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده که به آن نانوذرات اکسید مس برای افزایش ضریب هدایت حرارتی اضافه شده بود قرار داشت. در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر نانوذرات اکسید مس و همچنین اثر خارج از مرکز بودن بر فرایند شارژ پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و همچنین ذخیره انرژی در اثر تغییر این دو پارامتر پرداخته شده است. نتایج تجربی نشان داد که در مبدل حرارتی با خروج از مرکز ۱ اینچ حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات، ۱ درصد نانوذرات و بدون نانوذرات به ترتیب پارافین واکس در ساعات ۱۴:۲۰، ۱۵:۲۰، ۱۶:۲۰ به نقطه ذوب رسیده است و مبدل حرارتی با خروج از مرکز ۱ اینچ در مقایسه با مبدل حرارتی با خروج از مرکز ۰/۵ اینچ که هر دو حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات بودند به ترتیب در ساعات ۱۴:۲۰ و ۱۵:۴۰ به نقطه ذوب پارافین واکس رسیدند. در واقع می‌توان گفت که با پایین آوردن لوله داخلی مبدل حرارتی و افزودن نانوذرات، می‌توان فرایند ذوب شدن (شارژ) پارافین واکس و همچنین ذخیره انرژی حرارتی و کارایی مبدل حرارتی را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید.

۱- مقدمه

چگالی بسیار بالا در دمای تقریباً ثابت در حین تغییر فاز ذخیره می‌کنند [۱]. مزیت مذکور این سیستم‌ها سبب شده است که در کاربردهای مختلفی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی [۲]، سیستم‌های تهویه مطبوع [۳]، خنک‌کاری تراشه‌های الکترونیکی [۴]، بازیافت اتلافات حرارتی و کاربردهای سرمایه‌گذاری و گرمایش ساختمانی بسیار مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گیرند. از آنجایی که گرمای نهان ذوب و چگالی ذخیره انرژی مواد تغییر فاز دهنده مانند آب و پارافین واکس بالاست در نتیجه این مزیت به طراحان کمک می‌کند که حجم سیستم‌های ذخیره انرژی با گرمای نهان را کاهش دهند. از طرفی دیگر مواد تغییر فاز دهنده‌ای که در این سیستم‌ها استفاده می‌گردد دارای یک محدودیت جدی هستند که آن ضریب هدایتی پایین است. این محدودیت، سرعت فرایندهای انتقال حرارت را کند می‌کند زیرا انتقال حرارت کاهش یافته و در نتیجه فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد و طی یک بازه زمانی ثابت انرژی کمتری ذخیره می‌گردد. چندین روش برای غلبه بر این معضل ارائه شده است که از جمله می‌توان به سازه‌های ثابت با ضریب هدایت حرارتی بالا مانند فین‌های فلزی به منظور افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر ماده تغییر فاز دهنده اشاره کرد.

افزایش مداوم میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی از مهمترین محرک‌هایی هستند که به دانشمندان این انگیزه را داده تا برای جایگزینی منابع فوق به دنبال منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک باشند. یکی از پاک‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است، اما به دلیل قطع شدن این نوع انرژی در طول شب، چالش اصلی ذخیره انرژی به شکل مطلوب بوده تا عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی حذف گردد. یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای ذخیره این انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از گرمای نهان^۱ مواد تغییر فاز دهنده^۲ است. همان‌طور که می‌دانیم انرژی گرمای نهان در حین تغییر فاز بسیار بیشتر از انرژی گرمای محسوس است. سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با گرمای نهان، انرژی حرارتی را در طی فرایند تغییر فاز جامد به مایع ذخیره و بازیافت می‌کنند در حالی که تغییر فاز در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با گرمای محسوس^۳ در طول ذخیره انرژی و فرایندهای بازیافت رخ نمی‌دهد. سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با گرمای نهان نسبت به سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با گرمای محسوس، انرژی حرارتی را با

اخیراً با الهام گرفتن از ایده پخش نانوذرات در یک سیال پایه (نانوسیالات) برای کاربردهای انتقال حرارتی، ایده دیگری برای افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده پیشنهاد شده است بدین صورت که با پخش

- 1 Latent heat thermal energy storage system (LHTESS)
- 2 Phase change materials (PCMs)
- 3 Sensible heat thermal energy storage system (SHTESS)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mr_assari@yahoo.com

مس افزایش می‌یابد حجم ماده ذخیره کننده انرژی کاهش خواهد یافت. حسین زاده و همکاران [۹] به صورت عددی فرایند ذوب شدن مواد تغییر فاز دهنده نانو را داخل یک کپسول کروی دما ثابت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که نرخ ذوب شدن NePCM در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده معمولی افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش ضریب هدایت حرارتی بیان شد. همچنین نتایج نشان داد که انتقال حرارت اصلی در نواحی بالایی و کناره کره به صورت جابجایی طبیعی است در حالی که انتقال حرارت غالب در ناحیه پایینی کره به صورت انتقال حرارت هدایتی است.

نوآوری این مقاله را بدین صورت می‌توان بیان کرد که در پژوهش‌های پیشین ذوب ماده تغییر فاز دهنده نانو با استفاده از یک منبع حرارتی مصنوعی با شار حرارتی ثابت متصل به لوله داخلی یا خارجی مانند یک المنت برقی انجام شده است و هیچگونه تلاشی تاکنون برای بررسی اثر استفاده از شار حرارتی حاصل از آب گرم یک آبگرمکن خورشیدی برای کمک به ذوب پارافین واکس همراه با نانوذرات در یک فضای حلقوی انجام نشده است. همچنین نوآوری دیگر مقاله استفاده از پارافین واکس همراه با نانوذرات اکسید مس با اندازه ۴۰ نانومتر است که تحقیقات مربوط به نانو سیالات (نه مواد تغییر فاز دهنده نانو) نشان داده است که کلا نانوذرات با اندازه ۴۰ نانومتر بهترین عملکرد حرارتی از نظر اندازه را دارند. در این پژوهش تجربی ابتدا دو مبدل حرارتی دو لوله‌ای خارج از مرکز با خروج از مرکزیت‌های متفاوت ساخته شده است و هر کدام به صورت مجزا در مدار یک سیستم آبگرمکن خورشیدی اجباری (پمپی) قرار گرفته‌اند که این سیستم شامل یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت و یک مخزن ذخیره و یک پمپ گردش دهنده آب گرم است. از میان لوله داخلی این مبدل، آبی که توسط کلکتور خورشیدی گرم می‌شد عبور می‌کرد در حالی که در پوسته این مبدل پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده که به آن نانوذرات اکسید مس برای افزایش ضریب هدایت حرارتی اضافه شده قرار داشت. در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر نانوذرات اکسید مس و همچنین اثر خروج از مرکزیت بر فرایند شارژ پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پرداخته شده است.

۲- نحوه ساخت و نصب دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

سیستم آبگرمکن خورشیدی بکار برده شده در این تحقیق به صورت شماتیک و نمای واقعی آن به ترتیب در شکل ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. روش طراحی مبدل حرارتی بدین صورت بود که ابتدا میانگین تشعشعات خورشیدی تابیده شده به سطح کلکتور خورشیدی در طول روز اندازه گیری شد و سپس با در نظر گرفتن اتلافات حرارتی از کلکتور در اثر انتقال حرارت هدایتی و جابجایی طبیعی با استفاده از روابط و فرمول‌ها در مراجع معتبر، میزان گرمای مفید دریافتی کلکتور خورشیدی محاسبه شد و سپس برآورد شد که با توجه به گرمای نهان ذوب و گرمای محسوس پارافین واکس این مقدار گرمای مفید دریافتی چه مقدار پارافین واکس را می‌تواند ذوب کند که این مقدار ۵ کیلوگرم بدست آمد. ابعاد مبدل طوری در نظر

کردن نانوذرات در مواد تغییر فاز دهنده، کامپوزیتی همگن از نانوذرات و مواد تغییر فاز دهنده بدست آورده می‌شود که به آن مواد تغییر فاز دهنده افزوده شده با نانوذرات^۱ گویند. این کامپوزیت جدید دارای خواصی به مراتب بهتر از مواد تغییر فاز دهنده پایه می‌باشد [۵].

مشکلی که در مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای وجود دارد این است که بخشی از پارافین واکس که در قسمت پایینی فضای حلقوی پوسته آن قرار دارد حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد آن بعد از اتمام فرایند ذوب به صورت جامد و ذوب نشده باقی می‌ماند و علت آن این است که ذوب بخش بالایی پوسته بیشتر تحت تاثیر انتقال حرارت جابجایی طبیعی صورت گرفته و در بخش پایینی پوسته بیشتر تحت تاثیر انتقال حرارت هدایت صورت می‌گیرد و در این مبدل‌ها در ابتدا انتقال حرارت غالب، هدایت است ولی در ادامه انتقال حرارت غالب، انتقال حرارت جابجایی طبیعی است در نتیجه بخش بالایی سریعتر از بخش پایینی ذوب می‌شود که برای رفع این مشکل پیشنهاد شد که سطح حرارت پایین‌تر قرار گیرد یعنی مبدل خارج از مرکز باشد تا زمان کلی ذوب کاهش یابد.

آراسو و همکاران [۶] بررسی عددی را برای تعیین افزایش عملکرد پارافین واکس با نانوذرات اکسید آلومینیوم^۲ در مقایسه با پارافین واکس را در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای هم مرکز انجام دادند. تحلیل عددی به صورت سیکلی نشان داد که نرخ شارژ و دشارژ انرژی حرارتی می‌تواند با استفاده از NePCM در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده خالص به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. نانوذرات اکسید آلومینیوم قرار داده شده در پارافین واکس، ضریب هدایت حرارتی پایین آنرا افزایش داده و بنابراین نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. اما افزایش نرخ انتقال حرارت در فرایند انجماد بطریق تبادل حرارتی هدایت در مقایسه با فرایند ذوب بطریق تبادل حرارتی جابجایی طبیعی خیلی آشکارتر است. جورابیان و همکاران [۷] به صورت عددی افزایش انتقال حرارت (آب-یخ) به عنوان ماده تغییر فاز دهنده با ذرات معلق نانوذرات مس در فضای حلقوی افقی بین استوانه‌های حرارت داده شده به صورت همدمما که استوانه داخلی در دمای بالاتر نسبت به استوانه بیرونی است را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت بیشتر از NePCM در مقایسه با سیال پایه می‌تواند به دست آورده شود در حالی که توزیع دمایی یکنواخت آب/مس سریعتر از آب خالص بدست آورده شد و افزودن نانوذرات فرایند ذوب را تسریع می‌کند و حرکت دادن استوانه حرارت داده شده به بخش پایینی حلقه، نرخ ذوب در هر کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌دهد. بررسی عددی اثر پراکندگی نانوذرات مس بر روی عملکرد ذوب این-پارافین^۳ در داخل یک حفره حلقوی بین دو استوانه هم مرکز توسط سبطی و همکاران [۸] ارائه شد. آنها توضیح دادند که معلق کردن نانوذرات مس ضریب هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد و انتقال حرارت و به تبع آن زمان ذوب کوتاه می‌شود. از طرفی دیگر، هنگامی که غلظت نانوذره

- 1 Nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs)
- 2 Al_2O_3
- 3 n-Paraffin



Fig. 3. A view of two eccentric heat exchangers are built
شکل ۳: نمای از دو مبدل حرارتی خارج از مرکز ساخته شده

۰/۱ درجه سانتیگراد اندازه گیری می‌کند. دیتالاگر هر ۲۰ دقیقه یکبار دما را ثبت و در حافظه خود نگهداری می‌کند.

پارافین واکس^۲ با دمای ذوب ۵۵ درجه سانتیگراد به عنوان ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این پژوهش انتخاب شد. این ماده تغییر فاز دهنده به دلیل خواص ویژه‌ای که دارد برای کاربرد در سیستم ذخیره انرژی این پژوهش مناسب می‌باشد. برخی از این خواص عبارتند از: قرارگیری نقطه ذوب در محدوده دمای عملکردی سیستم آبرگرمکن خورشیدی این پروژه، گرمای نهان ذوب مناسب، پایداری حرارتی و شیمیایی در تغییر فازهای مکرر، غیرسمی و غیرقابل اشتعال بودن، غیر خوردنده و غیر انفجار بودن، قابلیت ذوب همگون، سازگاری با موادی که با آنها در تماس است، در دسترس و ارزان بودن.

در این پژوهش ابتدا آب از پایین‌ترین قسمت مخزن ذخیره توسط پمپ مکیده شده و به ورودی کلکتور هدایت می‌شود. سپس آب بعد از گردش در کلکتور، گرم شده و خروجی آن به ورودی مبدل وارد شده و بعد از تبادل حرارتی از خروجی مبدل خارج می‌شود و توسط لوله‌ای به بالاترین نقطه مخزن وارد می‌شود و این سیکل به همین صورت ادامه دارد. نحوه قرار دادن پارافین واکس در پوسته خارجی مبدل نیز بدین صورت است که ابتدا پارافین واکس جامد را در ظرفی حرارت داده تا ذوب شود و دمای آن به دمایی بالاتر از دمای ذوبش (۵۵ درجه) برسد. سپس نانوذرات اکسید مس به آرامی به آن اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شده تا به طور کامل

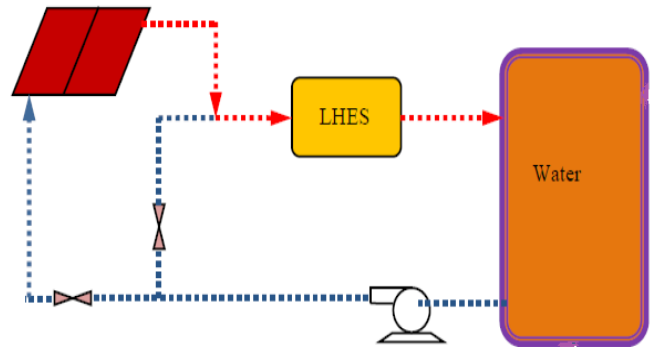


Fig. 1. A schematic of solar water heater of this investigation
شکل ۱: نمای شماتیک از سیستم آبرگرمکن خورشیدی این پژوهش



Fig. 2. A view of the solar water heater system
شکل ۲: نمای از سیستم آبرگرمکن خورشیدی این پژوهش

گرفته شد که فضای حلقوی بین دو لوله آن کمی بیشتر از ۵ کیلوگرم پارافین را در بگیرد تا همچنین بتواند تغییرات حجم حاصل از انجماد و ذوب مواد تغییر فاز دهنده را پوشش دهد. در این پژوهش دو مبدل حرارتی خارج از مرکز با خروج از مرکزیت‌های متفاوت ۰/۵ و ۱ اینچ ساخته شد در حالی که بقیه ابعاد و جنس آنها یکسان می‌باشد. لوله داخلی از جنس مس به قطر ۱ اینچ و لوله خارجی از جنس فولاد به قطر ۴ اینچ می‌باشد. در ضمن هر یک از مبدل‌ها با پشم شیشه به ضخامت ۵ سانتیمتر عایق‌بندی شده است. نمای از مبدل‌های ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین از یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت برای گردآوری تابش خورشیدی به منظور تامین حرارت برای ذوب مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده است.

مخزن ذخیره آب گرم مورد استفاده در این پژوهش یک مخزن با قطر ۳۸ سانتیمتر و ارتفاع ۹۳ سانتیمتر با حجم ۱۰۰ لیتر می‌باشد. با توجه به اینکه سیستم مورد نظر، سیستم جابجایی اجباری می‌باشد و برای به جریان انداختن آب گرم در مدار دستگاه آزمایش از یک الکتروپمپ سیرکولاتور آب گرم با دبی ۵ لیتر بر دقیقه و توان ۴۷ وات بعد از مخزن ذخیره و قبل از ورودی کلکتور استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری دمای NePCM خروجی مبدل‌ها و دمای محیط و سایر دماها از یک دیتالاگر دیجیتال^۱ استفاده شده است. این سنسورها کالیبره شده کارخانه بوده و محدوده دمایی ۵۵- تا ۱۲۵+ درجه سانتیگراد را با دقت

2 Paraffin wax

1 Digital data logger

جدول ۲: خواص ترمو-فیزیکی پارافین واکس

Table 2. Thermo-physical properties of paraffin wax

مقادیر	خواص
۰/۲۲ W/m K	ضریب هدایت حرارتی (مایع یا جامد) k
۷۹۰ kg/m ³	چگالی (مایع یا جامد) ρ
۲/۱۵ kJ/kg K	گرمای ویژه (مایع یا جامد) C_p
۱۹۰ kJ/kg	گرمای نهان ذوب λ
۵۵ °C	دمای ذوب
۰/۰۰۱ °C ⁻¹	ضریب انبساط گرمایی مایع
۲۹/۱×۱۰ ^{-۷} m ² /s	ضریب پخش حرارتی α

۳- نتایج و بحث

برای بررسی اثر نانوذرات اکسید مس بر فرایند ذوب شدن (شارژ) پارافین واکس در مبدل‌های حرارتی نوع A (با خروج از مرکزیت ۰/۵ اینچ) و نوع B (با خروج از مرکزیت ۱ اینچ) نمودار روند تغییرات دمایی سنسور دمایی TS9 (سنسور با بالاترین دما) برای بارگذاری نانوذرات با درصدهای مختلف در مبدل‌های نوع A و B در شکل ۵ و شکل ۶ رسم شده است. همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود مبدل حرارتی نوع A حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات در ساعت ۱۵:۴۰ به نقطه ذوب خود یعنی ۵۵ درجه سانتیگراد می‌رسد و همین مبدل حرارتی حاوی پارافین واکس با ۱ درصد نانوذرات و بدون نانوذرات به ترتیب در ساعات ۱۶:۴۰ و ۱۶:۲۰ به نقطه ذوب می‌رسد. همچنین مطابق شکل ۶ در مبدل حرارتی نوع B حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات، ۱ درصد نانوذرات و بدون نانوذرات به ترتیب ماده تغییر فاز دهنده در ساعات ۱۴:۲۰، ۱۵:۲۰ و ۱۶:۲۰ به نقطه ذوب می‌رسد. در واقع این دو نمودار نشان می‌دهند که نانوذرات اکسید مس فرایند ذوب شدن (شارژ شدن) پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده را تسریع می‌بخشند. به عبارتی دیگر پارافین واکس به واسطه افزودن نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی آن افزایش می‌یابد به تبع آن نرخ ذوب افزایش و زمان ذوب کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثر خارج از مرکز بودن بر فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی نوع A و نوع B، نمودار روند تغییرات سنسور TS9 که در پایین لوله مسی قرار دارد برای پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات در مبدل‌های نوع A و B در شکل ۷ مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می‌کنید پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات برای هر دو مبدل نوع A و B تا قبل از دمای ۵۲/۴ درجه سانتیگراد و ساعت ۱۳:۴۰ دارای دمای تقریباً یکسان است بعد از این دما دو نمودار از هم فاصله می‌گیرند به طوری که ماده تغییر فازدهنده مبدل نوع B در ساعت ۱۴:۲۰ به نقطه ذوب می‌رسد و مبدل نوع A در ساعت ۱۵:۴۰ به نقطه ذوب می‌رسد. در واقع در مبدل نوع B که دارای خروج از مرکزیت دو برابر مبدل نوع A است پارافین واکس زودتر ذوب می‌شود. علت آن را می‌توان این‌گونه توضیح داد که در مبدل

مخلوط شود و کلونیدی یکنواخت از NePCM بدست آید و سپس از طریق سوراخ تعبیه شده روی مبدل در پوسته مبدل ریخته شده است و به آن ۳ تا ۴ ساعت زمان داده شده است تا منجمد شده و سپس آزمایش با آن انجام شده است. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش‌ها در هفته اول شهریور ۱۳۹۳ در دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول انجام شده است. ۹ عدد سنسور دمایی در خروجی مبدل حرارتی در موقعیت‌های شعاعی و زاویه‌ای مختلف برای ثبت کردن دمای پارافین واکس و NePCM ای که درون مبدل قرار دارد مطابق شکل ۴ و جدول ۱ تعبیه شده است. برای هر مبدل حرارتی ۳ آزمایش و جمعا برای دو مبدل ۶ آزمایش انجام شد. در پوسته هر مبدل در آزمایش‌ها پارافین واکس بدون نانوذرات، با ۱ درصد نانوذرات و ۳ درصد نانوذرات قرار داده شد. آزمایشات و داده برداری‌ها به صورت متوالی و هر آزمایش در یک روز از ساعت ۱۰ تا ۲۰:۴۰ انجام شد.

در ضمن برای هر آزمایش مقدار ۵ کیلوگرم پارافین واکس ذوب شده و در پوسته مبدل ریخته شده است که خواص در جدول ۲ نشان داده شده است. نانوذرات استفاده شده نانوذرات اکسید مس با اندازه ۴۰ نانومتر و شکل کروی بوده است.

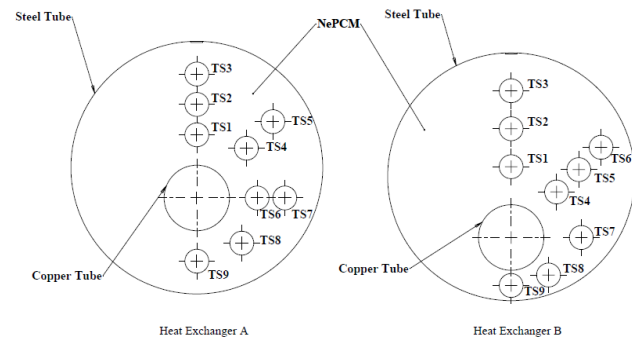


Fig. 4. A side view of heat exchangers in which the position of temperature sensors can be seen

شکل ۴: نمای جانبی مبدل‌های حرارتی برای نشان دادن موقعیت سنسورهای دمایی

جدول ۱: موقعیت‌های شعاعی و زاویه‌ای سنسورهای دمایی

Table 1. Radial and angular positions of temperature sensors

شماره حسگر دما	r_A (mm)	θ_A (°)	r_B (mm)	θ_B (°)
TS1	۲۶/۱	۹۰	۲۹/۶	۹۰
TS2	۳۹/۱	۹۰	۴۵/۵	۹۰
TS3	۵۱/۸	۹۰	۶۱/۳	۹۰
TS4	۲۹/۴	۴۵	۲۶/۹	۴۵
TS5	۴۵/۱	۴۵	۴۰/۱	۴۵
TS6	۲۵/۳	۰	۵۳/۳	۴۵
TS7	۳۶/۹	۰	۲۹/۴	۰
TS8	۲۶/۷	-۴۵	۲۲/۱	-۴۵
TS9	۲۶/۴	-۴۵	۲۰/۱	-۹۰

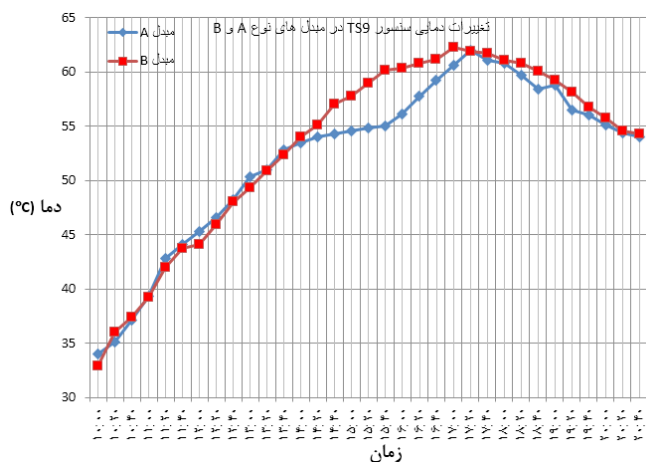


Fig. 7. Temperature variations of sensor TS9 for paraffin wax with loading 3wt% nanoparticles in the heat exchangers (A) and (B)
 شکل ۷: تغییرات دمایی سنسور TS9 برای پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات در مبدل های نوع A و B

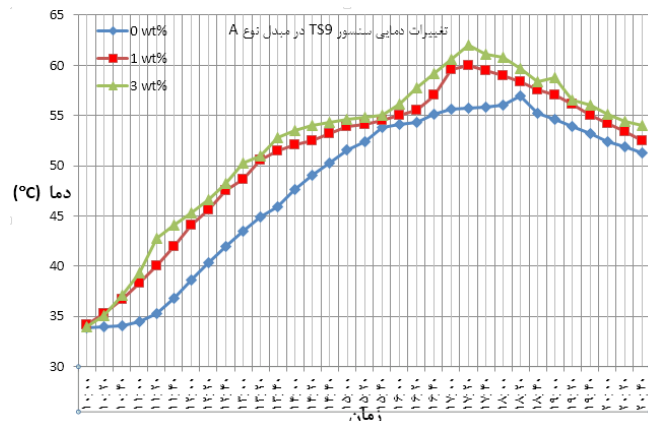


Fig. 5. Temperature variations of sensor TS9 for different loads of nanoparticles in the heat exchanger (A)
 شکل ۵: تغییرات دمایی سنسور TS9 برای بارگذاری نانوذرات با درصد های مختلف در مبدل نوع A

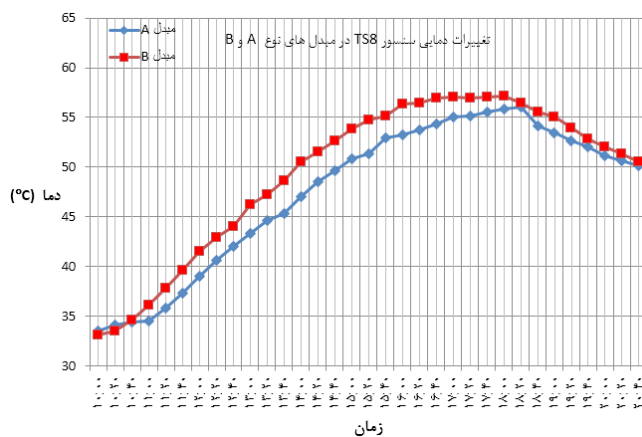


Fig. 8. Temperature variations of sensor TS8 for paraffin wax with loading 1wt% nanoparticles in the heat exchangers (A) and (B)
 شکل ۸: تغییرات دمایی سنسور TS8 برای پارافین واکس با ۱ درصد نانوذرات در مبدل های نوع A و B

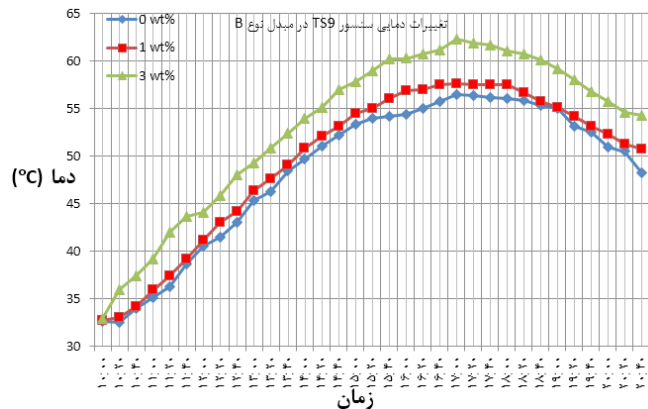


Fig. 6. Temperature variations of sensor TS9 for different loads of nanoparticles in the heat exchanger (B)
 شکل ۶: تغییرات دمایی سنسور TS9 برای بارگذاری نانوذرات با درصد های مختلف در مبدل نوع B

و تامین کننده حرارت کلکتور، تشعشع های خورشیدی در طول روز است، برای مقایسه مقدار حرارت دریافتی مبدل حرارتی در آزمایش های مختلف، داده های تابش خورشیدی در روزهای مختلف آزمایش در شکل ۹ با یکدیگر مقایسه شده اند. برای هر آزمایش تابش خورشیدی روی سطح صفحه جاذب کلکتور با استفاده از یک تابش سنج دیجیتال بر حسب وات بر مترمربع از ساعت ۱۰ الی ۱۹ ساعتی یکبار اندازه گیری شد. به سادگی از شکل ۹ می توان فهمید که هر ۶ آزمایش دارای تشعشع خورشیدی تقریباً نزدیک به هم و یکسانی هستند و ماکزیم تابش خورشیدی تقریباً در ساعت ۱۳:۳۰ رخ می دهد و همچنین بیشترین تابش به سطح کلکتور در بین این ۶ آزمایش مربوط به مبدل حرارتی نوع B با ۳ درصد نانوذرات می باشد و این یکی از دلایل بیشتر ذخیره شدن انرژی حرارتی نسبت به سایر آزمایش های انجام شده است.

حرارتی هم مرکز، دما و نرخ ذوب بالا در نیمه بالایی مبدل به دلیل نقش غالب جابجایی طبیعی رخ می دهد بنابراین می توان ذوب NePCM را با استفاده از خارج از مرکز کردن مبدل (پایین آوردن مرکز لوله داخلی) برای افزایش سطح، حجم و مقدار NePCM ای که در معرض اثر جابجایی طبیعی است تسریع بخشید.

همچنین برای بررسی اثر خارج از مرکز بودن بر فرایند ذوب، نمودار روند تغییرات سنسور TS8 که نیز در قسمت پایینی فضای حلقوی پوسته قرار دارد برای پارافین واکس با ۱ درصد نانوذرات در مبدل های نوع A و B در شکل ۸ رسم شده است. با دقت در این نمودار می توان دریافت که پارافین واکس در مبدل نوع B در ساعت ۱۵:۴۰ به نقطه ذوب می رسد و در مبدل نوع A در ساعت ۱۷ به نقطه ذوب می رسد. بنابراین مشاهده می شود که نتایج این نمودار مشابه نتایج نمودار ۷ است و دلیل آن مشابه دلیلی است که برای نمودار ۷ بیان شد.

از آنجایی که منبع تامین حرارت مبدل حرارتی، کلکتور خورشیدی است

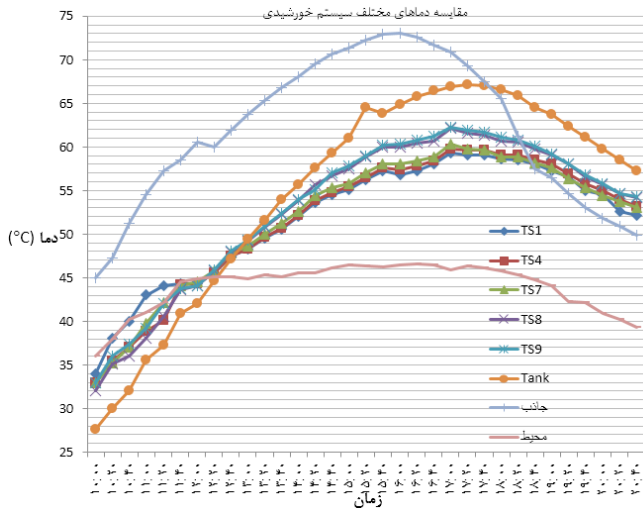


Fig. 10. A comparison of different temperatures of solar system in the heat exchanger (B) with paraffin wax containing 3% nanoparticles

شکل ۱۰: مقایسه دماهای مختلف سیستم خورشیدی در مبدل نوع B حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی اثر دو پارامتر نانوذرات اکسید مس و خارج از مرکز بودن بر فرایند ذوب پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و ذخیره انرژی در یک مبدل حرارتی خارج از مرکز در یک سیستم خورشیدی پرداخته شد. بدین منظور دو مبدل حرارتی خارج از مرکز مشابه اما با خروج از مرکزیت‌های ۰/۵ و ۱ اینچ ساخته شد تا اثر خارج از مرکز بودن بررسی گردد و به پارافین واکس موجود در پوسته مبدل‌های حرارتی نانوذرات اکسید مس افزوده شد تا اثر نانوذرات مورد ارزیابی قرار گیرد. هر کدام از این مبدل‌ها به صورت مجزا در مدار یک سیستم آبگرمکن خورشیدی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایشات به صورت زیر جمع‌بندی شده است:

۱. افزودن نانوذرات ضریب انتقال حرارت هدایتی ماده تغییر فاز دهنده را افزایش می‌دهد و خصوصیات ذوب مانند افزایش نرخ ذوب و تسریع در زمان شارژ را بهبود می‌بخشد.
۲. اندازه و نرخ افزایش زمان شارژ با بیشتر شدن تابش خورشیدی و به تبع آن حرارت بیشتر، افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش شار حرارتی شروع جابجایی طبیعی آسان‌تر صورت می‌گیرد که باعث شتاب بخشیدن به فرایند ذوب می‌گردد.
۳. مکانیزم انتقال حرارت غالب در ابتدای فرایند ذوب، هدایت است ولی در ادامه انتقال حرارت جابجایی، مکانیزم اصلی انتقال حرارت خواهد بود.
۴. مشاهده می‌شود که بخش بالایی فضای حلقوی به علت تقویت جابجایی طبیعی در اثر رشد ناحیه مذاب، فرایند ذوب شدن بسیار سریع از سایر بخش‌ها صورت می‌گیرد.
۵. تغییر مکان لوله داخلی به سمت پایین فضای حلقوی موجب

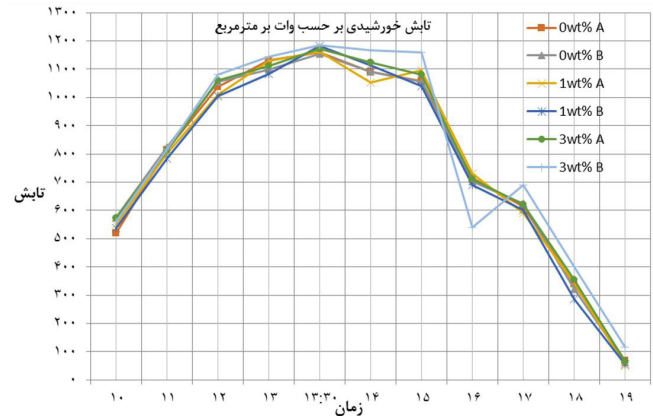


Fig. 9. A comparison of solar radiation for different experiments

شکل ۹: مقایسه تابش خورشیدی برای آزمایش‌های مختلف

همان طور که قبلاً بیان شد هدف از این مقاله بررسی اثر دو پارامتر نانوذرات و خارج از مرکز بودن بر فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده و ذخیره انرژی در یک مبدل حرارتی است ولی برای اینکه درکی صحیح از دماهای این سیستم خورشیدی به دست آید، دمای متوسط صفحه جاذب کلکتور، دمای متوسط مخزن، دمای محیط و دماهای سنسورهای تعبیه شده روی خروجی مبدل حرارتی برای یکی از این آزمایش‌ها مقایسه شده است. در شکل ۱۰ برای آزمایش مبدل نوع B حاوی پارافین واکس با ۳ درصد نانوذرات، دمای متوسط صفحه جاذب، دمای متوسط مخزن، دمای محیط و دماهای سنسورهای TS1، TS4، TS7، TS8 و TS9 که در زاویه‌های مختلف با اختلاف زاویه ۴۵ درجه ولی مجاور با لوله داخلی قرار دارند مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۰ همان‌طور که انتظار می‌رود ماکزیمم دمای سیستم خورشیدی از همان ابتدای آزمایش مربوط به صفحه جاذب است. این دمای ماکزیمم صفحه جاذب تا بعد از ظهر ادامه داشته تا این که در عصر به علت کاهش محسوس تشعشعات خورشیدی افت شدیدی در دمای صفحه جاذب رخ داده است به طوری که از ساعت ۱۹ به بعد دمای آن از خروجی مبدل حرارتی نیز کمتر شده است. دمای مخزن در ابتدای آزمایش که آب با دمای ۲۷ درجه سانتیگراد وارد آن می‌شود مینیمم است ولی با دریافت حرارت از کلکتور به تدریج دمای آن بالا می‌رود و در عصر با کاهش شدید دمای صفحه جاذب، دمای مخزن نیز افت می‌کند اما در پایان آزمایش همان‌طور که انتظار می‌رود بالاترین دما مربوط به مخزن است. دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای قرار گرفته در خروجی مبدل تقریباً به هم نزدیک می‌باشند. در بین این سنسورها، دو سنسور TS8 و TS9 بالاترین دما را نشان داده‌اند زیرا نسبت به تمام سنسورها به لوله داخلی که منبع حرارتی است نزدیک‌ترین روند تغییرات دمایی این ۵ سنسور روی خروجی مبدل بدین صورت است که به تدریج با دریافت حرارت از کلکتور دمای آنها افزایش یافته و سپس در دمای ذوب پارافین واکس یعنی ۵۵ درجه سانتیگراد برای مدتی تقریباً ثابت می‌شود تا فرایند شارژ صورت گیرد سپس دوباره افزایش یافته و در پایان با افت دمای جاذب کاهش می‌یابد. دمای محیط در ابتدا پایین است سپس در طول آزمایش تقریباً ثابت می‌ماند.

- storage, International journal of refrigeration, 31 (2008) 892-901.
- [4] W.G. Alshaer, S. A. N., M.A. Rady, Thermal management of electronic devices using carbon foam and PCM., nano-composite, 89 (2015) 79-86.
- [5] V. Pandiyarajan, M. C. P., E. Malan, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage, 88 (2011) 77-87.
- [6] A. V. Arasu, A. P. S., A. S. Mujumdar, Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in a concentric pipe latent heat storage system, 17(2013) 419-430.
- [7] M. Jourabian , M. F., A. R. Darzi, Outward melting of ice enhanced Cu nanoparticles inside cylindrical horizontal annulus: lattice Boltzmann approach, from [http:// dx.doi.org/10.1016/j.amp.2013.04.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.amp.2013.04.003).
- [8] S. S. Sebti., S. H. K., I. Mirzaee, S. F. and S. K. Hosseinizadeh., M. Abdollahzadeh, A numerical investigation of solidification in horizontal concentric annuli filled with nano-enhanced phase change material (NePCM), 13(2011) 9-15.
- [9] S. F. Hosseinizadeh, A. A. R. D., F. L. Tan, Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NePCM) inside a spherical container, International journal thermal sciences, 51 (2012) 77-83.

می‌شود تا ماده تغییر فاز دهنده بیشتری در دسترس نیروی شناوری قرار گیرد و در نهایت موجب افزایش نرخ فرایند ذوب و به تبع آن کاهش زمان ذوب گردد.

۶. هر چه لوله داخلی به سمت پایین‌تر در فضای حلقوی جابجا شود عملکرد مبدل بهتر می‌شود و مقدار انرژی ذخیره شده و کسر پارافین بیشتر می‌شود، زیرا تا آخرین لحظات فرایند ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده نیروی شناوری فعال است.

۷. هر چه لوله داخلی مبدل حرارتی به سمت پایین‌تر در فضای حلقوی جابجا شود به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، این ماده در بالاترین قسمت فضای حلقوی به صورت جامد باقی می‌ماند. برای حل این مشکل علاوه بر افزودن نانوذرات می‌توان دور لوله داخلی پره های طولی با ضریب هدایت حرارتی بالا استفاده کرد.

منابع

- [1] S. Jegadheeswaran, S. D. P, Performance enhancement in latent heat thermal storage system : A review, Renewable and sustainable energy reviews, 13 (2009) 2225-2244.
- [2] S.M. Shalaby, M. A. B. , Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium., energy conversation and management., 83 (2014) 1-8.
- [3] K. Azzouz, D. L., D. Gobin, Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R. Assari, R. Nasiri, A. Alipoor, Experimental Study of Charge of Paraffin Wax Along with Nanoparticles in an Eccentric Double Tube Heat Exchanger for Storing Energy in a Solar Water Heater, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1403-1409.
DOI: 10.22060/mej.2017.12148.5270

