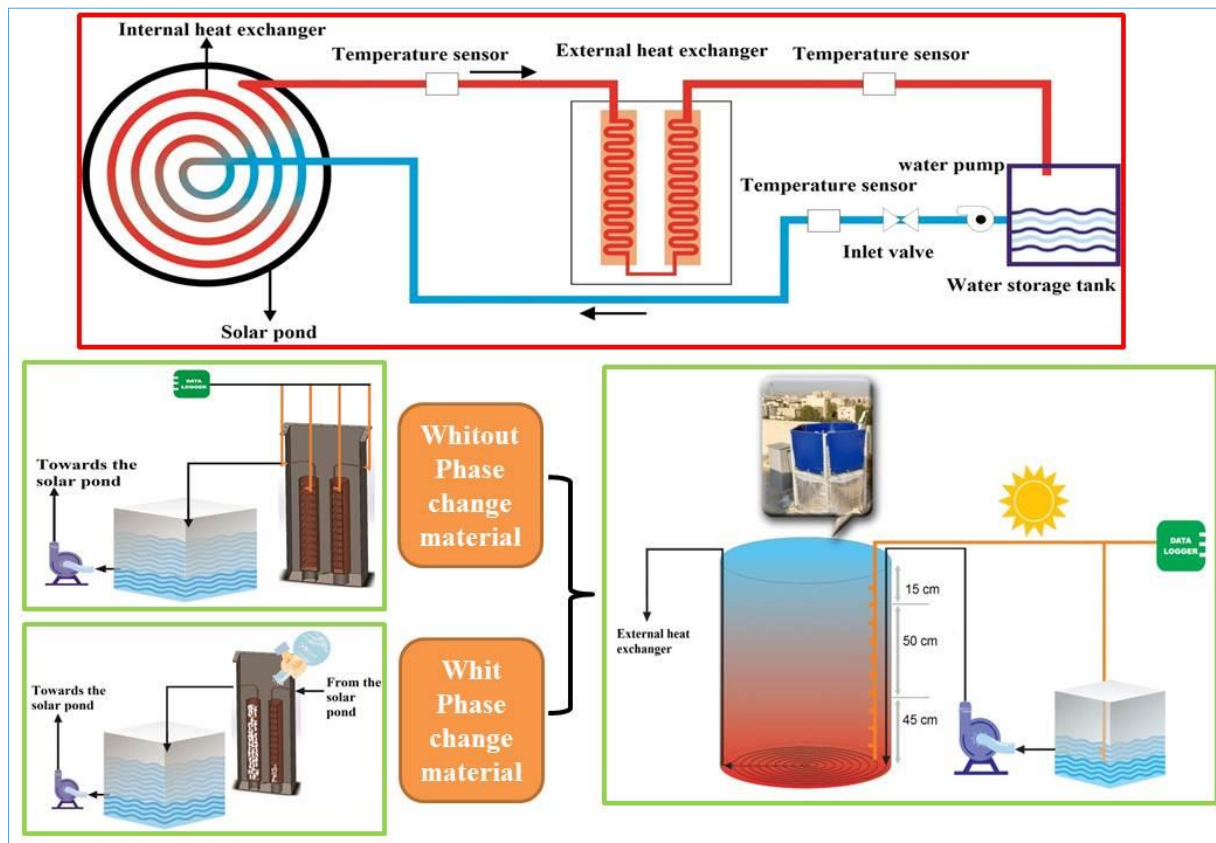


Construction of a Solar Pond and Evaluation of Its Performance with Phase Change Materials

EHSAN FARSIJANI¹, HOSSEIN MOBLI^{1*}, MORTAZA AGHBASHLO¹

1. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran.

(Received: Feb. 22, 2021- Revised: May 28, 2021- Accepted: July 19, 2021)



ABSTRACT: Due to the absence of the sun from sunset to sunrise, the use of energy storage systems is of considerable importance. In this research, a solar pond with a circular cross-section with a diameter of 110 and a height of 120 cm was constructed. In this pond, to extract heat from its lower area, an internal and external heat exchanger was considered, which transferred heat from the solar pond to the consumer by circulating fluid in this area. To receive stable heat, paraffin wax phase change materials were used in the external heat exchanger. The tests were performed and analyzed in two days, without paraffin wax and with it. The thermal discharge period of paraffin wax lasted about 12 hours. To analyze the temperature difference of the external heat exchanger, the data were analyzed using a t-test in two independent groups using SPSS 16 software at a significant level ($P < 0.05$), with ($t = 2.09$, $P = 0.04$). This difference was significant. The energy efficiency of the system without PCM and with PCM was 76.0% and 84.6%, respectively, which in the experiment using phase change materials, higher energy efficiency was obtained. Also, the exergy efficiency of the system in the experiment without PCM and using PCM was 11.9% and 15.9%, respectively, which was higher in the experiment using phase change materials.

Keywords: Solar pond, Renewable energy, Exergy, Energy calculations, Phase change materials.

* Corresponding Author's Email: hmobli@ut.ac.ir

ساخت استخر خورشیدی و ارزیابی عملکرد آن با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده

احسان فارسیجانی^۱، حسین مبلی^{۱*}، مرتضی آغباشلو^۱

۱. گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری

کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۲۸)

چکیده: با توجه به عدم حضور خورشید از غروب تا طلوع، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی اهمیت قابل توجهی پیدا می‌کنند. در این پژوهش یک استخر خورشیدی با مقطع دایره‌ای به ارتفاع ۱۲۰ و قطر ۱۱۰ سانتی‌متر ساخته شده و استحصال گرما در آن توسط مبدل‌های گرمایی داخلی و خارجی از ناحیه پائینی استخر انجام شد. برای دریافت پایدار گرما، در مبدل گرمایی خارجی از پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده (PCM) استفاده گردید. آزمون‌ها در دو روز، بدون ماده PCM و با PCM بررسی و تحلیل شدند. تخلیه گرمایی پارافین واکس حدود ۱۲ ساعت زمان برد. به منظور تحلیل تفاوت‌های دمایی نقطه مرجع مبدل گرمایی خارجی، داده‌ها با استفاده از آزمون تی در دو گروه مستقل از طریق نرم افزار SPSS 16 در سطح معناداری ($P < 0.05$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت ($t = 2.09, p = 0.04$) که این اختلاف معنادار شد. بازده انرژی سامانه بدون PCM و با PCM به ترتیب ۷۶/۰٪ و ۸۴/۶٪ بدست آمد لذا در آزمایش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بازده انرژی بیشتری حاصل شد. همچنین بازده اکسرژی سامانه در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۱۱/۹٪ و ۱۵/۹٪ بدست آمد که نشان می‌دهد با مواد تغییر فاز دهنده بازده اکسرژی بیشتری حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: استخر خورشیدی، انرژی‌های تجدید پذیر، اکسرژی، محاسبات انرژی، مواد تغییر فاز دهنده.

مقدمه

تامین انرژی یکی از مهمترین نگرانی‌های جوامع بشری است که انتخاب نوع آن از دو دیدگاه کلی مورد بررسی قرار گرفته است، اولین دیدگاه توجه به امنیت انرژی می‌باشد، در این دیدگاه امنیت، بدان معنی است که انرژی مورد نیاز از منابع متنوع با قیمتی مقرون به صرفه تأمین شود (Cherp & Jewell, 2014). دیدگاه دوم مربوط به آلودگی ایجاد شده توسط منابع انرژی می‌باشد (Victor & Kennel, 2014)، در این دیدگاه با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره مشکلات زیست محیطی از قبیل آلودگی آب‌وهوا و تغییرات اقلیمی که بیشترین تاثیر را در گرمایش زمین دارند، جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از پیش اهمیت می‌یابد (Beik et al., 2019). در جهان کنونی آمار میزان مصرف انرژی نشان می‌دهد، سوخت‌های فسیلی که شامل نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ هستند در بیشتر کشورها وجود نداشته و استفاده از آن‌ها سبب افزایش مقدار دی اکسید کربن اتمسفر محیط می‌شود. بنابراین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نقش قابل توجهی در امنیت انرژی و محیط زیست دارد و در این راستا انتخاب‌های مختلفی وجود دارد که به نظر می‌رسد انرژی خورشیدی به سبب دسترسی بیشتر و پاک‌تر بودن نسبت به منابع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر محبوبیت بیشتری دارد (Abdullah, 2017).

انرژی خورشیدی را می‌توان در اشکال مختلف انرژی مانند انرژی‌های جنبشی، مغناطیسی و حرارتی ذخیره کرد که در این راستا سامانه ذخیره گرمای نهان یکی از اشکال مهم آن می‌باشد. این سامانه بر اساس جذب و آزادسازی گرما در اثر تغییر فاز مواد از جامد به مایع، مایع به گاز و بالعکس عمل می‌کند (Pillai & Brinkworth, 1976). استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ی گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۱، روش

مناسبی برای ذخیره انرژی می‌باشد که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مواد تغییر فاز دهنده در سامانه‌های ذخیره گرمای نهان استفاده می‌شوند که در حین عملیات شارژ و دشارژ به وسیله گرمای جذب شده و آزاد شده در یک فرآیند هم دما عمل می‌کنند. این مواد با تغییرات کم دمایی، قابلیت زیادی برای ذخیره گرما دارند، به طوری که این تغییر اندک دما، توان عملکردی بالایی در آنها ایجاد می‌نماید. در طول شب‌ها یا روزهای ابری هنگامی که دما کاهش می‌یابد، روند تغییر فاز شروع شده و گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده آزاد می‌گردد و انرژی حرارتی آزاد شده باعث گرم شدن سیالی می‌شود که در مجاورت این مواد هستند (Abhat, 1983). مواد تغییر فاز دهنده به عنوان مواد ذخیره کننده انرژی شناخته می‌شوند و در سه کلاس آلی، غیر آلی و اوتکتیک^۲ طبقه‌بندی می‌گردند که در شکل ۱ این طبقه بندی نشان داده شده است (Sharam et al., 2009).

استخر خورشیدی یکی از انواع سامانه‌های ذخیره-ساز انرژی گرمایی می‌باشد که شامل سه لایه آب نمک با غلظت‌های متفاوت می‌باشد، این لایه‌ها عبارتند از: لایه همرفت بالایی^۳ (UCZ)، لایه غیر همرفت میانی^۴ (NCZ) و لایه همرفت پائینی^۵ (LCZ).

هنگامی که انرژی خورشیدی به وسیله یک استخر معمولی جذب می‌شود آب در قسمت‌های پائین استخر گرم شده و به سمت سطح استخر حرکت می‌کند و آب گرم در سطح استخر، گرمای خود را به محیط اطراف منتقل می‌نماید. در استخر خورشیدی که از سه لایه با غلظت‌های مختلف تشکیل می‌گردد، از پدیده ذکر شده جلوگیری می‌شود، به این صورت که غلظت نمکی که در لایه پائینی استخر وجود دارد باعث سنگینی آب شده و از حرکت آب به سمت بالا جلوگیری می‌کند. لایه بالایی

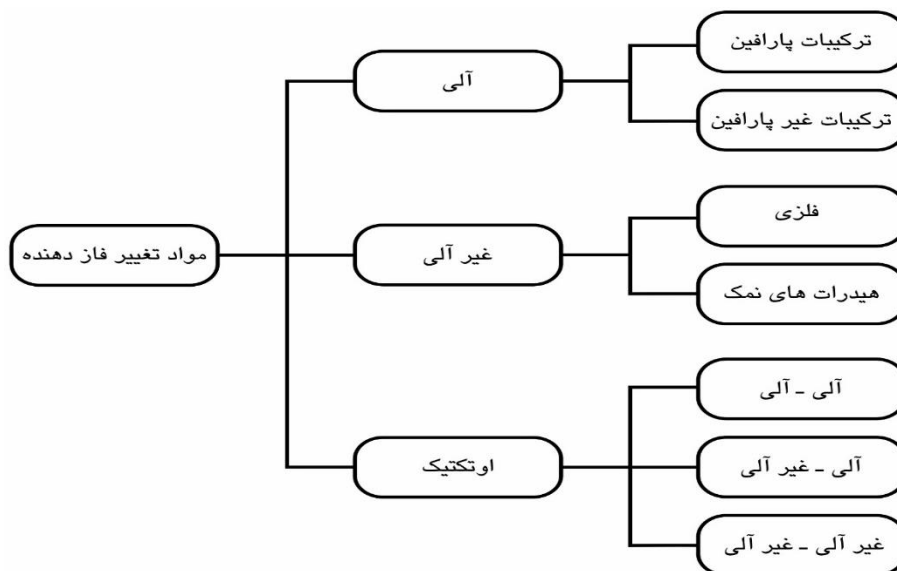
4 The none convective zone
5 The lower convective zone

1 Phase Change Materials
2 Eutectic
3 The upper convective zone

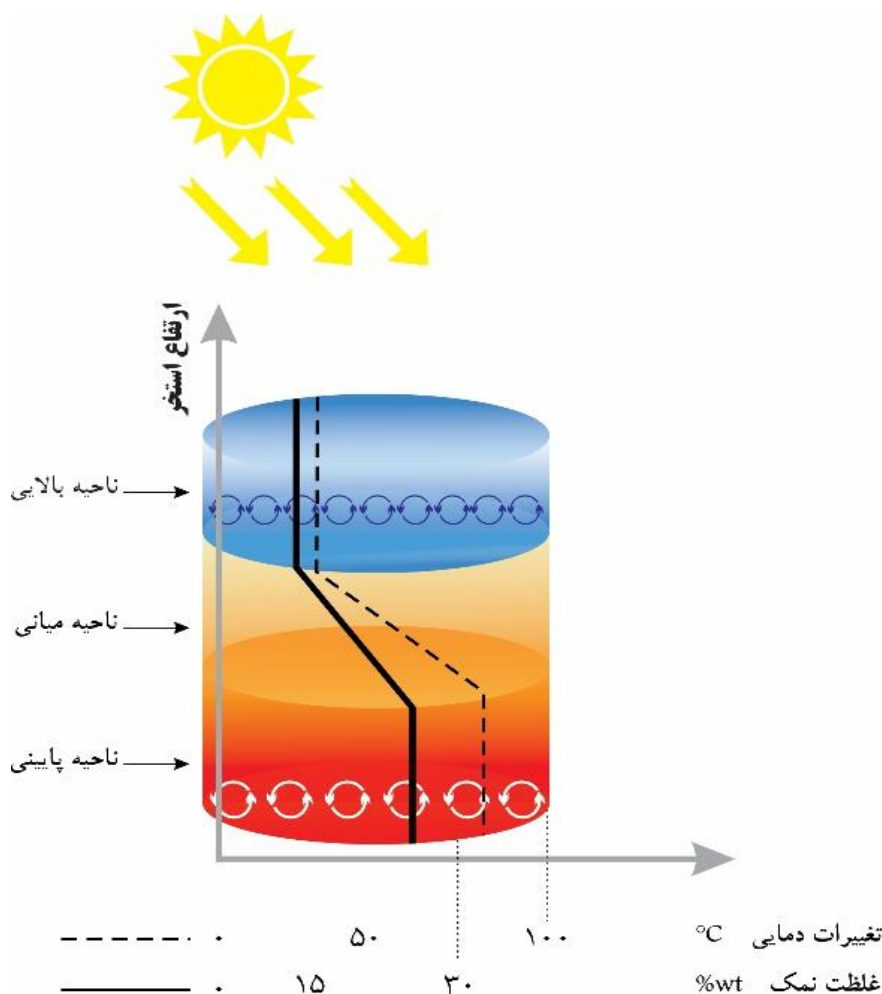
(LCZ)، به علت جذب تشعشعات خورشید دارای بیشترین مقدار گرما بوده و غلظت یکنواختی دارد و نزدیک به منطقه اشباع از نمک است. طبق روال معمول گرمای موجود در استخر خورشیدی از لایه پائینی با دو روش مرسوم خارج می‌گردد: ۱- آب نمک موجود در ناحیه پائینی را در یک سیکل بسته از استخر خارج کرده و در یک مبدل گرمایی در بیرون از استخر، گرمای آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۲- گرمای موجود در ناحیه لایه پائینی توسط لوله‌هایی که درون آنها آب سرد در جریان است از قسمت پائین استخر یا کنار دیواره‌ها استحصال شده و مورد استفاده قرار می‌دهند (Satish, et al, 2015).

استخر خورشیدی در صنعت و کشاورزی کاربردهای فراوانی دارد (Tester et al., 2005)، که برخی از آنها تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها، شیرین‌سازی آب دریا، خشک کردن محصولات کشاورزی و استفاده از گرمای استخر خورشیدی برای تولید برق را می‌توان نام برد (Duffie & Beckman, 2013). در این راستا یکی از اهداف اصلی این پژوهش در آینده تأمین انرژی پایدار مورد نیاز خشک کردن محصولات کشاورزی و بررسی تاثیر آن بر هزینه‌های انرژی مصرفی می‌باشد.

استخر خورشیدی (UCZ)، شامل آب شفاف و زلال می‌باشد و اولین ناحیه‌ای است که خورشید به آن می‌تابد، قدری از این تابش جذب شده و باقی‌مانده آن از لایه بالایی عبور می‌کند. این لایه دارای شوری کمی می‌باشد و به علت کم بودن ضخامت این لایه، انتقال گرما در این ناحیه به صورت همرفت اتفاق می‌افتد (Bahram, 2013). لایه میانی (NCZ) استخر که نیمی از عمق آن را تشکیل می‌دهد غلظت نمک بالاتری از لایه بالایی دارد. شوری موجود در لایه میانی از شوری کم در مرز فوقانی تا بسیار شور در مرز پائین آن ادامه دارد، به دلیل وجود شیب غلظت نمک در این لایه، انتقال گرما به صورت غیر همرفت است. لایه میانی سبب پایداری شده که می‌تواند ناحیه عایقی برای لایه پائینی محسوب شود. بنابراین به علت عایق شدن لایه میانی مقدار کمی از انرژی هنگام نفوذ اشعه‌های خورشیدی به لایه پائینی از بین خواهد رفت. مهم ترین نکته در منطقه لایه میانی حفظ و نگهداری شیب شوری می‌باشد، زیرا منطقه‌ای حیاتی برای عملکرد صحیح استخر خورشیدی است (González et al., 2016). در شکل ۲ طرحواره استخر خورشیدی به همراه نمودار گرادیان شوری و دمایی لایه‌های مختلف نشان داده شده است. لایه پائینی



شکل ۱- دسته بندی مواد تغییر فاز دهنده از نظر ساختار مواد تشکیل دهنده



شکل ۲- نمایش تغییرات دمایی و غلظت نمک در لایه‌های مختلف استخر خورشیدی

دریافت که بازده اکسرژی در لایه میانی مقطع مربعی 0.17% و در مقطع دایره‌ای 0.08% می‌باشد. بازده اکسرژی در لایه پائینی در مقطع مربعی 1.19% و در مقطع دایره‌ای 2.24% محاسبه گردید. در تحقیقی یک استخر خورشیدی با مقیاس کوچک ساخته شد و با استفاده از یک پمپ، سیکل بازی از چرخش آب با مبدل گرمایی داخلی در لایه پائینی ایجاد گردید که گرما را به مبدل گرمایی خارجی منتقل می‌کرد. دوره بررسی این تحقیق برای یک دوره یک هفته‌ای در تابستان و دوره ۲ ماهه در زمستان بود که نشان داد بازده حرارتی در یک دوره زمانی محدود نسبتاً بالا بود (Jaefarzadeh, 2006). در تحقیقی دیگر به بررسی انتقال حرارت در مبدل گرمایی داخل استخر خورشیدی با روش عددی پرداخته شد. در این تحقیق، دو روش انتقال حرارت از ناحیه پائینی به

در مورد استخرهای خورشیدی و مواد تغییر فزاینده پژوهش‌های مختلفی انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. (Dehghan *et al.*, 2013) به بررسی عملکرد استخرهای خورشیدی با مقاطع مختلف پرداخت. او در این راستا تحلیل تجربی و محاسبه انرژی و اکسرژی لایه‌های مختلف استخرهای خورشیدی را بررسی کرد. بدین‌منظور دو استخر خورشیدی در ابعاد کوچک با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای ساخت. با ثبت دما در لایه‌های مختلف استخرها، محاسبه انرژی و اکسرژی لایه‌های مختلف پرداخته و دریافت که بازده انرژی لایه میانی در مقطع مربعی 17.3% و در مقطع دایره‌ای 17.2% می‌باشد و بازده انرژی در لایه پائینی در مقطع مربعی 23.6% و در مقطع دایره‌ای 25.8% بود. همچنین با محاسبه اکسرژی

LCZ استخر خورشیدی پرداخته شد و با مدل‌سازی استخر خورشیدی به صورت تجربی مقایسه‌ای بین مدل نظری و تجربی انجام گرفت. در این پژوهش از محفظه‌ای استوانه‌ای شکل برای قراردادن مواد تغییر فاز دهنده در ناحیه LCZ استفاده شده بود. با توجه به داده‌های تجربی تفاوت مقدار دمای اندازه‌گیری شده در حالت تجربی و نظری ۲/۵٪ بود (Beik *et al.*, 2019). در تحقیقی با استفاده از جریان دادن PCM بر روی سلول فتوولتاییک توانستند دمای سلول را در اوج دوره تابش خورشید کاهش دهند و عملکرد سامانه فتوولتاییک را بهبود بخشند، سامانه پیشنهادی توانست بازده الکتریکی را از ۷/۱٪ به ۱۳/۷٪ برساند (Al-Waeli *et al.*, 2017). یک مطالعه تجربی بر روی مبدل گرمایی پوسته و لوله‌ای افقی با ماده تغییر فاز دهنده با متوسط دمای ۱۱۷/۷ درجه سلسیوس در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند. در این مطالعه اثبات کردند که به کارگیری چند لوله در داخل پوسته موجب بهبود نرخ انتقال حرارت در طی فرآیند شارژ و دشارژ می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که انتقال حرارت در جهات شعاعی و زاویه‌ای، در طی فرآیند مطالعه تغییر فاز، در هر دو سامانه ایجاد می‌گردد که بیانگر دو بعدی بودن انتقال حرارت در سامانه می‌باشد (Agyenim *et al.*, 2009). در پژوهشی یک مبدل حرارتی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و به صورت تجربی جامد شدن اسید استئاریک^۲ را در لوله‌های عمودی مبدل حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. برای بررسی تاثیر PCM از یک لوله مسی که درون مبدل حرارتی بود استفاده کردند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال گرما مستقیماً با دمای داخلی مرتبط است و عدد رینولدز تاثیر خیلی کمی روی نرخ جامد شدن دارد (Liu & Sun, 2005).

بررسی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته نشان داد که تا کنون تحقیقی بر روی ارزیابی عملکرد کلی

تنهایی و انتقال حرارت از دو لایه پائینی و میانی مورد بررسی قرار گرفت (Date, 2013). Tundee *et al.* (2010) به بررسی استحصال گرما از لایه پائینی با مبدل گرمایی داخلی در استخر خورشیدی پرداخت و بدین منظور استخر خورشیدی در ابعاد کوچک ساخت و از سیال R134a به عنوان مایعی که حرارت را از لایه پائینی دریافت کرده و به مبدل گرمایی خارجی منتقل می‌کند، استفاده کرد. برای چرخش مایع در لایه پائینی از روش ترموسیفون^۱ استفاده نمود. و به مقایسه نظری و تجربی گرمای دریافت شده از استخر خورشیدی پرداخت که نتایج آزمون مطابقت خوبی با یکدیگر نشان داد. در پژوهشی گرمای هدر رفته از زیر استخر خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت و گرمای هدر رفته از زیر استخر با عبور مبدل گرمایی از زمین زیر استخر خورشیدی بازیابی شد. همچنین با داده‌های تجربی بدست آمده از استخر خورشیدی مشخص گردید که گرمای بازیابی شده از زمین ممکن است مقدار قابل توجهی باشد که تقریباً برابر با گرمای استخراج شده از لایه پائینی است. از این رو با بی‌توجهی به عایق بندی محل استقرار استخر خورشیدی، گرمای هدر رفت از زمین تا ۵۰٪ انرژی گرمایی استخر خورشیدی برآورد شد (Ganguly *et al.*, 2017). در تحقیق دیگری به بررسی اثر اتلاف گرما از دیواره‌های استخر خورشیدی به روش عددی و تجربی پرداخته شد. در این تحقیق وابسته بودن ضخامت و نوع عایق به شدت تابش خورشیدی و دمای هر لایه از استخر خورشیدی بررسی شده است. با بررسی عددی و تجربی، آنها نشان دادند که سطح مقطع دایره‌ای استخر برای عایق بندی موثر دیواره‌ها مناسب می‌باشد. یکی از روش‌های بهبود ذخیره گرمایی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد که پژوهش‌های مختلفی در این باره انجام شده است (Kumar & Das, 2021) در پژوهشی به بررسی استفاده از PCM در لایه

اکسرژی سامانه انجام شد.

مواد و روش ها

برای انجام آزمایش‌ها و ارزیابی عملکرد استخر خورشیدی نیاز به ساخت یک سامانه استخر خورشیدی بود. سامانه‌ی ساخته شده در این پژوهش از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. ۱- استخر خورشیدی ۲- مبدل گرمایی داخلی ۳- مبدل گرمایی خارجی، در شکل ۳ نمای کلی سامانه نشان داده شده است. این سامانه امکان بررسی و انجام آزمایش‌های گوناگون را برای بدست آوردن بازده ترمودینامیکی و تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی فراهم نمود.

سامانه استخر خورشیدی با استفاده از مبدل گرمایی خارجی و مواد تغییر فاز دهنده انجام نشده است. لذا هدف این تحقیق، ارزیابی عملکرد استخر خورشیدی در دو حالت با مواد تغییر فاز دهنده و بدون مواد تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی خارجی است. در این پژوهش گرمای بدست آمده از استخر خورشیدی را با مبدل گرمایی داخلی که به صورت لوله‌های حلزونی شکل درون استخر قرار داشت به وسیله آب شیرین از استخر استحصال کرده و به مبدل گرمایی خارجی که بیرون از استخر خورشیدی بود منتقل گردید. برای ارزیابی اثرات مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد استخر خورشیدی، داده‌های تجربی برای دو حالت با پارافین و بدون پارافین در مبدل گرمایی خارجی استخراج و تحلیل انرژی و



شکل ۳- سامانه استخر خورشیدی استفاده شده در این تحقیق و بخش‌های مختلف آن

مشخصات استخر در جدول ۱ نشان داده شده است. برای جلوگیری از انتقال گرما از دیواره‌های استخر و کف آن، از پوشش پشم شیشه به ضخامت سه سانتی‌متر استفاده گردید. استخر با روش ژانگراندو برای ساخت گرادیان نمک آماده سازی شد (Zangrando, 1980)، بدین منظور در مرحله اول، استخر خورشیدی با آب

استخر خورشیدی

برای ساخت استخر، از یک قاب فلزی به قطر داخلی ۱۱۰ و ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر استفاده شد. پارچه‌ی پی‌وی‌سی سه لایه با روکش چرم، که با نام تجاری پارچه برزنت کانتینری شناخته می‌شود با توجه به ابعاد قاب آماده گردید و درون قاب فلزی با آن پوشانده شد.

گرمای ناحیه پائینی را با استفاده از مایعی که درون آن‌ها در جریان است به مبدل گرمایی خارجی انتقال می‌دهد. در پژوهش حاضر از آب شیرین به عنوان مایع انتقال گرما استفاده شد که مقدار دبی آن 0.04 لیتر در دقیقه و دمای ورودی آن 25 درجه سلسیوس تنظیم گردید. شکل ۴ طرحواره استحصال گرما از استخر خورشیدی با مبدل گرمایی داخلی و خارجی را نشان می‌دهد.

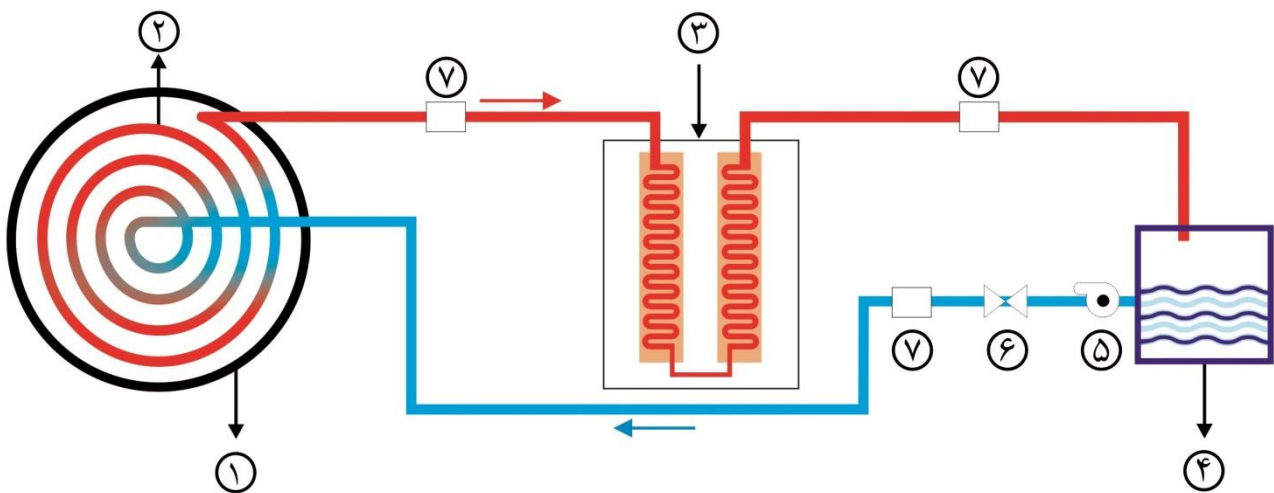
جدول ۱- مشخصات محل قرارگیری و ساختار استخر خورشیدی استفاده شده در این تحقیق

پارامتر	مقدار
موقعیت	تهران $35.71^\circ N, 51.33^\circ E$
ارتفاع استخر	۱۲۰ سانتی‌متر
قطر استخر	۱۱۰ سانتی‌متر
ارتفاع لایه پائینی استخر	۴۵ سانتی‌متر
ارتفاع لایه میانی استخر	۵۰ سانتی‌متر
ارتفاع لایه بالایی استخر	۱۵ سانتی‌متر
غلظت آب نمک لایه پائینی	$1/190 \frac{kg}{m^3}$
غلظت آب نمک لایه میانی	از $1/190 \frac{kg}{m^3}$ تا $1/05 \frac{kg}{m^3}$
غلظت آب نمک لایه بالایی	$1/011 \frac{kg}{m^3}$
نوع نمک	NaCl (سدیم کلرید)

نمک غلیظ پر شده و سپس در ارتفاعات مختلف، آب خالص به آب نمک تزریق گردید تا به تدریج آب نمک غلیظ شده را رقیق کرده و شیب مطلوب را ایجاد نماید. به منظور ثبت مشخصات غلظت لایه‌های مختلف استخر خورشیدی، نمونه‌هایی از آب نمک با روش ساده سیفون سازی با کمک جاذبه^۱ از عمق‌های مختلف استخراج شده و با چگالی سنج DMA35N از شرکت Anton Paar با دقت $\pm 0.0001 \frac{g}{cm^3}$ اندازه‌گیری گردید و در جدول ۱ ثبت شد.

مبدل گرمایی داخلی

برای خارج کردن گرما از استخر خورشیدی از مبدل گرمایی داخلی استفاده شد. مبدل گرمایی داخلی که در کف استخر قرار دارد برای انتقال گرما ذخیره شده از کف استخر با لوله‌هایی که به صورت چیدمان حلزونی طراحی و ساخته شده است گرما را به خارج از استخر منتقل می‌کند (Li, 2017). این لوله‌های سیلیکونی که به صورت حلزونی در ناحیه پائینی استخر خورشیدی نصب شده‌اند



شکل ۴- جزئیات سامانه استحصال گرما از استخر خورشیدی شامل: (۱) استخر خورشیدی، (۲) مبدل گرمایی داخلی، (۳) مبدل گرمایی خارجی، (۴) مخزن ذخیره آب، (۵) پمپ آب، (۶) شیر ورودی، (۷) سنسورهای دما

گردید. در شکل ۵ مبدل گرمایی خارجی نشان داده شده است. این مبدل که دارای یک ورودی و یک خروجی می‌باشد حاوی آب شیرین در حال گردش است. برای ثبت دمای داخل مبدل گرمایی از یک نقطه مرجع در

مبدل گرمایی خارجی

مبدل گرمایی خارجی با دو لوله‌ی درون هم و از جنس مس ساخته شد و در بیرون استخر خورشیدی نصب

مدل سه بعدی

اندازه‌گیری دما و تابش خورشید

مشخصات آب و هوایی از قبیل مقدار تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط، اندازه‌گیری شد. دما در طول ارتفاع استخر با فاصله ۱۰ سانتی‌متر با نرخ دو ثانیه یکبار و با استفاده از حسگر حرارتی در دیتالاگر ثبت گردید. با استفاده از ۱۵ حسگر، دمای استخر در ارتفاع‌های متفاوت و دمای آب ورودی و خروجی مبدل گرمایی - خارجی و دمای محفظه ماده تغییر فاز دهنده ثبت گردید. مدل حسگر دمایی مورد استفاده، DS18B20 با دامنه تغییرات ۵۵ تا ۱۲۵ درجه سلسیوس با دقت ۰/۵ درجه بود. در این راستا عدم قطعیت کلی در اندازه‌گیری هر ابزار اندازه‌گیری از رابطه ۱ بدست آمد (Valderrama et al., 2011).

(رابطه ۱)

$$\delta_{total} = \sqrt{(\delta_{instrument})^2 + (\delta_{sensor})^2}$$

$$\delta_{sensor} = \frac{0.5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.2887^\circ\text{C}$$

$$\delta_{instrument} = 0.0087^\circ\text{C}$$

$$\delta_{total} = 0.2888^\circ\text{C} \cong 0.29^\circ\text{C}$$

شدت تابش خورشیدی به عنوان یک پارامتر مهم

در محاسبات انرژی و اکسرژی سامانه در یک سطح افقی اندازه‌گیری شد که برای محاسبه آن از پیرانومتر مدل 1333R ساخت شرکت TES با دقت $\pm 1 \frac{W}{m^2}$ استفاده گردید و در هر ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری به عمل آمد.

آنالیز دمای خروجی از مبدل گرمایی خارجی

برای ارزیابی عملکرد استخر خورشیدی، میزان گرمای بدست آمده از استخر خورشیدی از رابطه ۲ بدست آمد:

$$Q = AU \frac{(T_o - T_i)}{\ln \frac{T_p - T_i}{T_p - T_o}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

A سطح مقطع خارجی لوله حلزونی، U ضریب انتقال گرما است و T_p ، T_i ، T_o به ترتیب بیانگر دمای خارج شده و وارده شده به مبدل گرمایی داخلی و دمای استخر خورشیدی هستند.

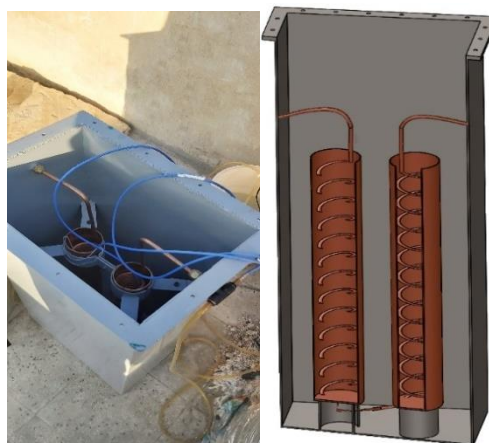
انرژی مصرف شده در مبدل گرمایی خارجی و

لوله‌های خارج از استخر از رابطه ۳ حاصل شد:

داخل مواد تغییر فاز دهنده استفاده شد که تغییرات دمایی آن، هر ۵ ثانیه یکبار به وسیله دیتالاگر ثبت گردید. در این پژوهش در مبدل گرمایی خارجی از پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد، یکی از مهم‌ترین دلایل انتخاب پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده با صرفه و در دسترس بودن آن می‌باشد (Colla, 2017). ماده تغییر فاز دهنده از شرکت Merc با کد ۱۰۷۱۵۰ خریداری گردید که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در این مبدل دو لوله مسی حاوی مواد تغییر فاز دهنده قرار گرفته‌اند که لوله‌های حلزونی مارپیچی از داخل آن‌ها عبور می‌کنند، این لوله‌های مارپیچی حاوی آبی است که در لایه پائینی در مبدل گرمایی داخلی گردش کرده و گرمای استخر خورشیدی را به مواد تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی خارجی منتقل می‌نماید. مواد تغییر فاز دهنده با افزایش دما به علت دارا بودن گرمای نهان بالا، دچار تغییر فاز شدند و به عنوان سامانه ذخیره ساز گرما عمل می‌کنند.

جدول ۲- مشخصات پارافین وکس استفاده شده به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و مشخصات لوله حاوی آن

مقدار	یکا	خاصیت
۴۴	$^\circ\text{C}$	نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده
۹۰۰	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی
۲/۹	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$	ظرفیت گرمایی ویژه
۲۱۰	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	گرمای نهان ذوب
۶	cm	قطر لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده
۴۶	cm	ارتفاع لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده



شکل ۵- مبدل گرمایی خارجی استفاده شده در این پژوهش. راست: نمای بالا مبدل گرمایی خارجی در حین کار در سامانه، چپ: نمای برش خورده

پائینی در استخر خورشیدی طبق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد:

$$Q_{ext} = \dot{m} A_c P (T_{LCZ} - T_{in}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

E_{solar} معرف میزان انرژی خورشیدی جذب شده به وسیله استخر خورشیدی است و از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$E_{solar} = I_T \times A_c \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این رابطه A_c سطح استخر خورشیدی است که مورد تابش خورشید قرار می‌گیرد (m^2) و I_T اندازه تابش خورشید است ($\frac{W}{m^2}$).

E_{lost} بیانگر مقدار انرژی از دست رفته است که طبق فرمول ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$E_{lost} = E_{ref} + E_{loss} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

E_{ref} بیانگر انرژی بازتابش شده از سطح استخر است. E_{loss} معرف مقدار انرژی‌های تلف شده از دیواره‌ها یا کف استخر و انرژی‌هایی که در داخل سامانه در بین لایه‌های مختلف از دست رفته‌اند.

برای محاسبه مقدار انرژی E_{ref} با توجه به نوع ساختار استخر از ضریب ۰/۴ استفاده گردید و طبق فرمول ۱۱ محاسبه شد:

$$E_{ref} = 0.4 E_{lost} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

برای محاسبه بازده انرژی کلی سامانه از فرمول ۱۲ استفاده می‌شود:

$$\eta = \left(\frac{E_{out}}{E_{in} + E_{solar}} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

آنالیز اکسرژی سامانه استخر خورشیدی اکسرژی بیانگر بیشترین مقدار کار مفید یک سامانه است که طبق رابطه ۱۳ برای سامانه استخر خورشیدی قابل تعریف است:

$$E_{Xin} - E_{Xout} - E_{Xsdes} - E_{Xloss} - E_{Xref} = E_{Xstore} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

E_{Xstore} معرف مقدار اکسرژی ذخیره شده است و با فرض اینکه استخر خورشیدی حالت پایدار عمل کند برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، مقدار اکسرژی ورودی است و شامل اکسرژی ورودی به وسیله سیال در

$$Q = \dot{m} C (T_0 - T_i) \quad (\text{رابطه ۳})$$

نرخ جریان سیال در گردش و C گرمای ویژه سیال در گردش است که در این مطالعه آب شیرین است.

دمای خروجی می‌تواند طبق فرمول ۱ و ۲ از رابطه ۴ بدست آید:

$$T_0 = T_p - \frac{(T_p - T_i)}{\exp\left(\frac{UA}{\dot{m}C}\right)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه ۳ دمای داخلی سامانه به انرژی مصرف شده در خارج استخر خورشیدی بستگی دارد. دمای استخر خورشیدی به مقدار انرژی جذب شده از تابش خورشید در لایه پائینی وابسته است و تابع نمایی $\left(\frac{UA}{\dot{m}C}\right)$ به مشخصات هندسی و گرمایی- فیزیکی مبدل گرمایی داخلی، مایع در گردش و تخلیه آن بستگی دارد. با افزایش ضریب کلی انتقال حرارت، یا مساحت مبدل گرمایی داخلی، مقدار T_0 یا مقدار انرژی استخراج شده از استخر افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش تخلیه یا گرمای ویژه مایع در گردش، دمای خروجی کاهش می‌یابد (Sabetta et al., 1985). در این پژوهش آزمون-ها در دو روز، بدون ماده پارافین واکس و با پارافین واکس بررسی و تحلیل شدند.

آنالیز انرژی سامانه استخر خورشیدی

آنالیز کلی انرژی سامانه از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$E_{in} + E_{solar} - E_{out} = E_{lost} \quad (\text{رابطه ۵})$$

E_{in} انرژی ورودی و E_{out} انرژی خروجی از سامانه به وسیله سیال در گردش است که طبق فرمول ۶ و ۷ محاسبه می‌گردد:

$$E_{in} = \dot{m} c_p (T_{in} - T_0) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$E_{out} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_0) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه c_p ظرفیت گرمای ویژه آب $\frac{kJ}{kg^\circ K}$ ، \dot{m} نرخ جریان جرمی سیال عبوری از لوله‌های مبدل گرمایی T_0 و T_{in} دمای سیال ورودی و دمای مرجع (K) می‌باشند.

انرژی مفید بدست آمده از عبور سیال از لایه

شده موثر است و طبق رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$E_{Xsdes} = T_0(\Delta S_{gen}) \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

ΔS_{gen} مجموعه آنتروپی تولید شده در سامانه است.

برای بدست آوردن اکسرژی تلف شده $E_{X_{losse}}$ از رابطه ۱۹ استفاده می‌گردد:

$$E_{X_{losse}} = \dot{Q}_{losse} \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

در رابطه ۱۹، T_s دمای میانگین استخر می باشد. برای محاسبه بازده اکسرژی سامانه، بازده اکسرژی مبدل حرارتی و بازده اکسرژی استخر خورشیدی با یکدیگر جمع شد و بازده کلی سامانه طبق فرمول ۲۰ محاسبه گردید:

$$E_{X_{eff}} = \frac{(E_{X_{out}} - E_{X_{in}})}{E_{X_{solar}}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

نتایج و بحث

برای ارزیابی عملکرد استخر خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده دو نوع آزمایش طراحی و انجام شد. در مرحله اول، عملکرد استخر خورشیدی ساخته شده بدون مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله دوم، برای بررسی اثرات مواد تغییر فاز دهنده روی گرمای دریافتی از استخر خورشیدی از پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی خارجی استفاده گردید و نتایج حاصل از دو آزمون با یکدیگر مقایسه شدند.

تابش خورشید یکی از پارامترهای مهم در گرمای ذخیره شده در استخر خورشیدی است و داده‌های تجربی میزان تابش خورشید تحت شرایط آب و هوایی آفتابی با دمای محیط ۳۸ درجه سلسیوس در مرداد ماه ۹۹ ثبت شد. نرخ تابش ساعتی، متوسط تابش بود که به وسیله پیرانومتر اندازه‌گیری گردید (شکل ۶). طبق اطلاعات دریافتی از ساعت ۱۲ تا ۱۳ بیشترین مقدار تابش خورشیدی دریافت شد که مقدارش به ۱۰۵۰ وات بر مترمربع در روز اول و ۱۰۶۰ وات بر مترمربع در روز دوم رسید. در این راستا اختلاف معنی داری که بر

گردش E_{Xf} و اکسرژی مربوط به جذب تشعشع خورشیدی سامانه E_{Xsolar} است و از فرمول ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$E_{Xin} = E_{Xf} + E_{Xsolar} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

اکسرژی تابشی خورشید که بوسیله Petala (2003) اصلاح شده است، طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_{Xsolar} = \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right) \dot{Q}_{solar}$$

در این رابطه T_0 معرف دمای مرجع (K)، T_{sun} بیانگر دمای سطح خورشید است که 5777°K در نظر گرفتیم. (Duffie and Beckman, 2013) \dot{Q}_{solar} معرف نرخ تابش گرمایی خورشید است که با اندازه‌گیری تابش خورشیدی قابل محاسبه است.

اکسرژی سیال ورودی سامانه طبق رابطه ۱۶ بدست می‌آید:

$$E_{Xf} = \dot{m}c_w \left((T_{in} - T_0) - T_0 \ln \frac{T_{in}}{T_0} \right)$$

E_{Xout} معرف مقدار اکسرژی خروجی به وسیله جریان سیال از سامانه است و طبق رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

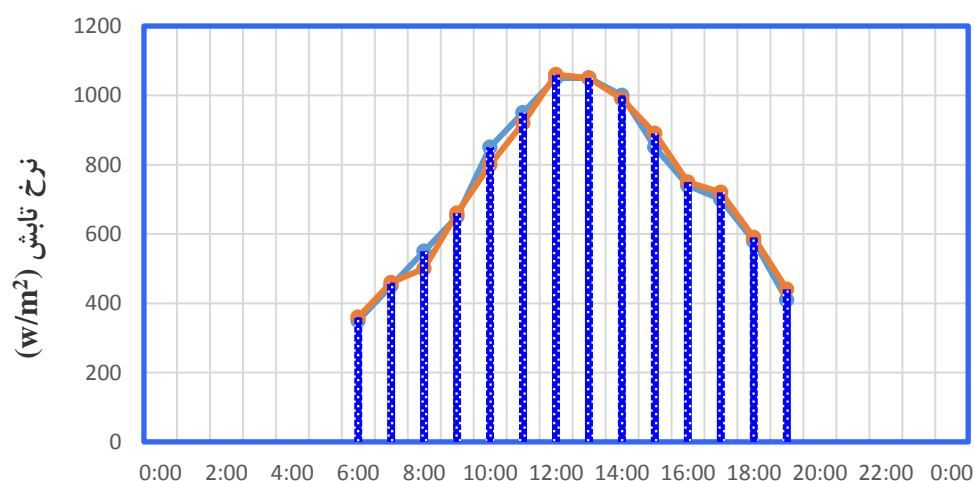
$$E_{Xout} = \dot{m}c_w \left((T_{out} - T_0) - T_0 \ln \frac{T_{out}}{T_0} \right) \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

مقدار E_{Xloss} اکسرژی هدر رفته شامل مقدار اکسرژی از دست رفته از دیواره‌ها و کف استخر خورشیدی، اکسرژی از دست رفته از بازتابش انرژی از ناحیه بالایی استخر خورشیدی و انرژی از دست رفته از لوله‌های مبدل حرارتی می‌باشد (Karakilcik and Dincer, 2008). E_{Xsdes} معرف اکسرژی تخریب شده است و باعث کاهش مقدار اکسرژی مفید می‌شود. اکسرژی تخریب شده به علت اختلاف دما بین لایه‌های استخر خورشیدی و همچنین اختلاف دما بین سیال ورودی و ناحیه پائینی استخر خورشیدی به وجود می‌آید. افزایش آنتروپی سامانه نیز بر اکسرژی تخریب

شروع تخلیه گرمایی، دمای پارافین با شیب تند کاهش می‌یابد، زیرا انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده به عنوان گرمای محسوس آزاد می‌شود. هنگامی که دمای پارافین تقریباً به دمای نقطه ذوب در ۴۴ درجه سلسیوس می‌رسد، پارافین شروع به انجماد می‌کند و این وضعیت تا زمانی که کل پارافین داخل لوله مبدل گرمایی کاملاً منجمد گردد ادامه می‌یابد. در حقیقت پس از کاهش دمای آب ورودی در بعدازظهر، دمای پارافین به شدت تا نقطه انجماد کاهش یافته و پس از آن دما به آرامی کاهش می‌یابد. مدت زمان انجماد، با حفظ فرآیند تخلیه گرمایی حدود ۱۲ ساعت طول کشید.

عملکرد استخر خورشیدی تاثیر بگذارد ثبت نگردید و می‌توان تقریباً شدت تابش خورشید را برای هر دو روز یکسان در نظر گرفت. مساحت سطح زیر نمودار تابش که در شکل ۶ با رنگ آبی مشخص شده است، بیانگر میزان انرژی گرمایی رسیده به سطح استخر خورشیدی است که $10/1 \pm 0/1$ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روزهای آزمایش به دست آمد.

برای بررسی سرعت تخلیه گرما از مواد تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی خارجی، آزمایشی با ثبت داده به وسیله دیتالاگر و سنسور دما انجام شد. بعد از گرم کردن لوله حاوی پارافین در مبدل گرمایی نرخ کاهش دما نسبت به یک نقطه مرجع در لوله محتوی پارافین اندازه‌گیری شد. مطابق شکل ۷ پس از ۹۰ دقیقه از زمان



(h) زمان

● تابش خورشید روز اول ● تابش خورشید روز دوم

شکل ۶- شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایش و سطح زیر نمودار آن

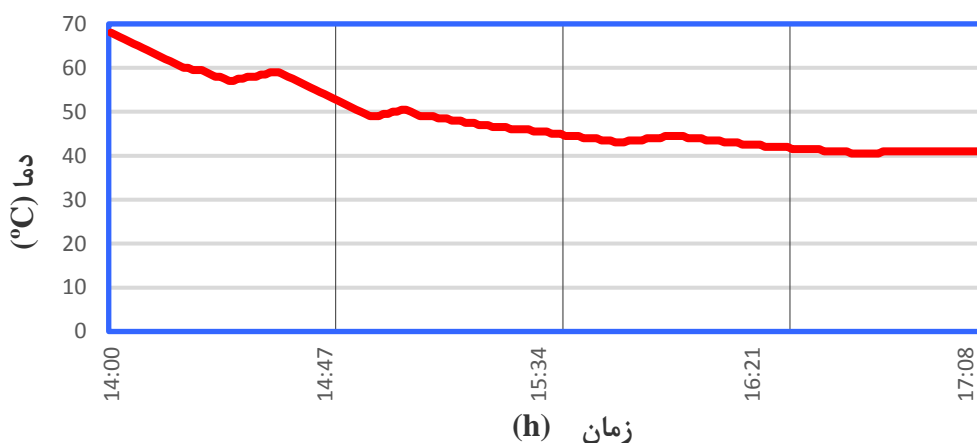
را دارا می‌باشد. از آنجا که لایه‌های میانی و بالایی شوری کمی دارند، در مقایسه با ناحیه پائینی، دمای پائین‌تری خواهند داشت (Abdullah, 2017).

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است دمای ناحیه بالایی به دلیل همرفت گرمایی، ضخامت کم این ناحیه و شوری کم آن با دمای محیط تقریباً یکسان می‌باشد و همچنین تبادل گرمایی مستقیم با هوای بیرونی دارد. تغییرات دمایی این ناحیه نیز مثل تغییرات دمای

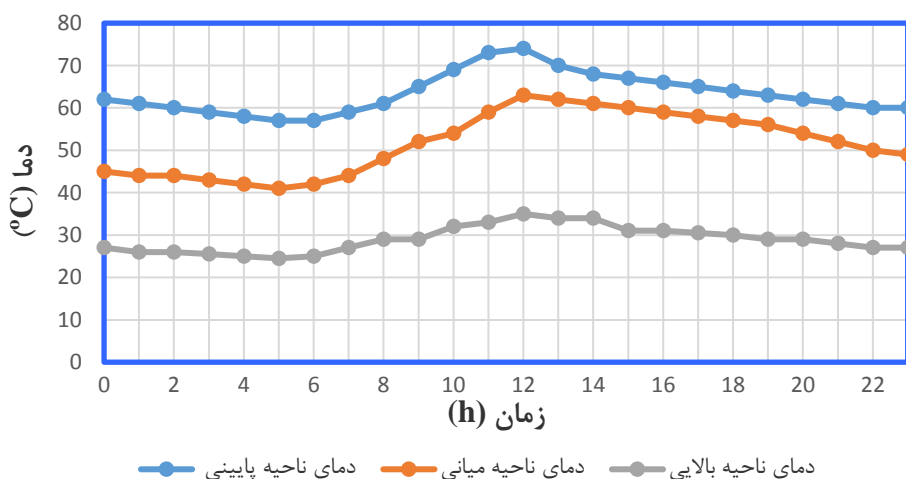
با توجه به ثبت دما در ناحیه‌های مختلف استخر خورشیدی تغییرات دما در طول شبانه روز برای استخر خورشیدی در تمام مناطق بالایی، میانی و پائینی طی روز اول و دوم اندازه‌گیری شد. در شکل ۸ و ۹ این تغییرات نمایش داده شده است. با گذشت چند روز از استقرار استخر خورشیدی، دما در ناحیه‌های مختلف تفاوت دارد، این مطلب به دلیل وجود تفاوت غلظت نمک در لایه‌های مختلف است زیرا نمک توانایی ذخیره گرما

۱۲:۰۰ بیشترین تابش و بالاترین دمای ثبت شده در لایه‌های مختلف استخر ثبت شده است (Khalilian, 2017). در روز اول دمای لایه پائینی در ساعت ۱۲:۰۰ به ۷۴ درجه سلسیوس رسید که بیشترین دما در طول روز است و پائین‌ترین دما در ساعت ۵:۰۰ در دمای ۵۸ درجه سلسیوس ثبت شده است.

هوای بیرون استخر است. رفتار دمایی ناحیه میانی با دمایی کمتر از ناحیه پائینی تغییر می‌کند چون گرادیان نمک ایجاد شده در این ناحیه از غلظتی بیشتر در نزدیک لایه پائینی، به غلظتی کمتر در ناحیه‌ی نزدیک لایه بالایی می‌باشد. لایه پائینی به علت شوری زیاد در حد اشباع، محل ذخیره گرما بوده و دارای بیشترین مقدار گرما در بین لایه‌های استخر خورشیدی است. در ساعت



شکل ۷- نمودار تخلیه گرمایی ماده تغییر فاز دهنده تا رسیدن به دمای ثابت



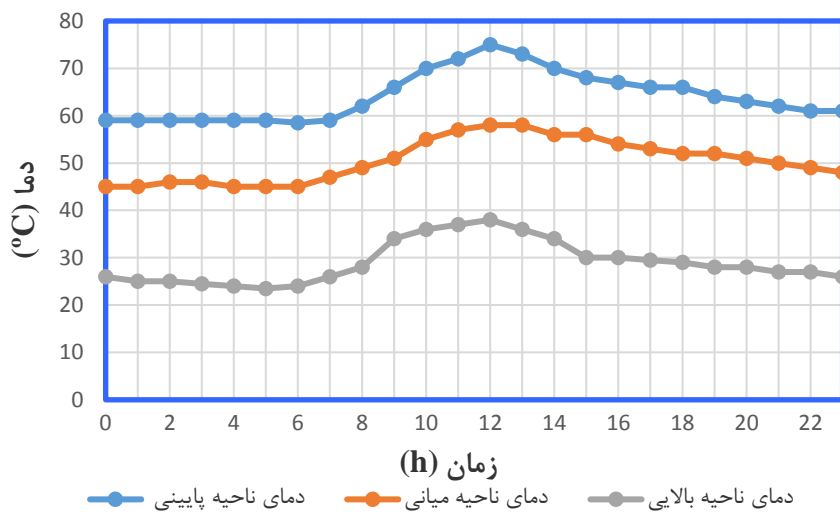
شکل ۸- تغییرات دمایی در لایه‌های مختلف استخر خورشیدی در روز اول آزمایش

دمایی لایه‌های مختلف استخر خورشیدی در روز اول و دوم، این تغییرات در دو روز آزمون تفاوت محسوسی در دما نشان نمی‌دهد و می‌توان از تاثیر دمای لایه‌های استخر خورشیدی در گرمای استحصال شده از مبدل- گرمایی داخلی صرف نظر کرد. مایعی که درون استخر خورشیدی، گرما را از ناحیه

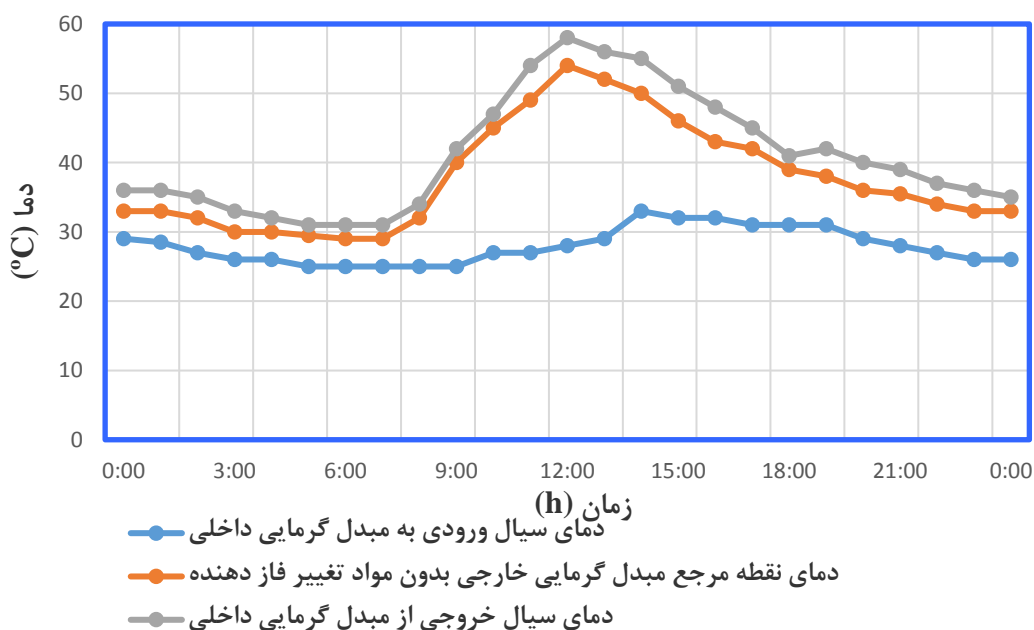
نمودار تغییرات دمایی لایه‌های مختلف استخر خورشیدی در روز دوم در شکل ۹ نشان داده شده است. بیشترین دمای لایه پائینی در ساعت ۱۲:۰۰ ثبت شده است که مقدار آن ۷۵ درجه سلسیوس است و کمترین میزان دمای آن در ساعت ۶:۰۰ با دمای ۵۸/۵ درجه سلسیوس ثبت شده است. با توجه به نمودار تغییرات

را دوباره تکرار می‌کند. شکل ۱۰ دمای آب شیرین ورودی به استخر خورشیدی و خروجی از آن و دمایی که مبدل گرمایی خارجی بدون حضور مواد تغییر فازدهنده در نقطه مرجع دارد را در روز اول، نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است دمای آب ورودی به مبدل گرمایی خارجی همواره بالاتر از دمای داخل مبدل گرمایی است و گرما از آب در گردش به مبدل گرمایی خارجی منتقل می‌شود.

پائینی دریافت می‌کند و در مبدل گرمایی خارجی گرما را به هوا منتقل می‌نماید، آب شیرین است. آب ابتدا با پمپ از مخزنی که برای ذخیره سازی آن استفاده شده است به مبدل گرمایی داخلی در ناحیه پائینی استخر خورشیدی منتقل می‌شود و سپس به مبدل گرمایی خارجی وارد می‌گردد و در آنجا با عبور از لوله‌های حلزونی شکل از جنس مس، گرمای خود را به هوا منتقل می‌کند و سپس دوباره به مخزن ریخته می‌شود و پس از خنک شدن و رسیدن به دمای محیط، سیکل مذکور



شکل ۹- تغییرات دمایی در لایه‌های استخر خورشیدی در روز دوم آزمایش

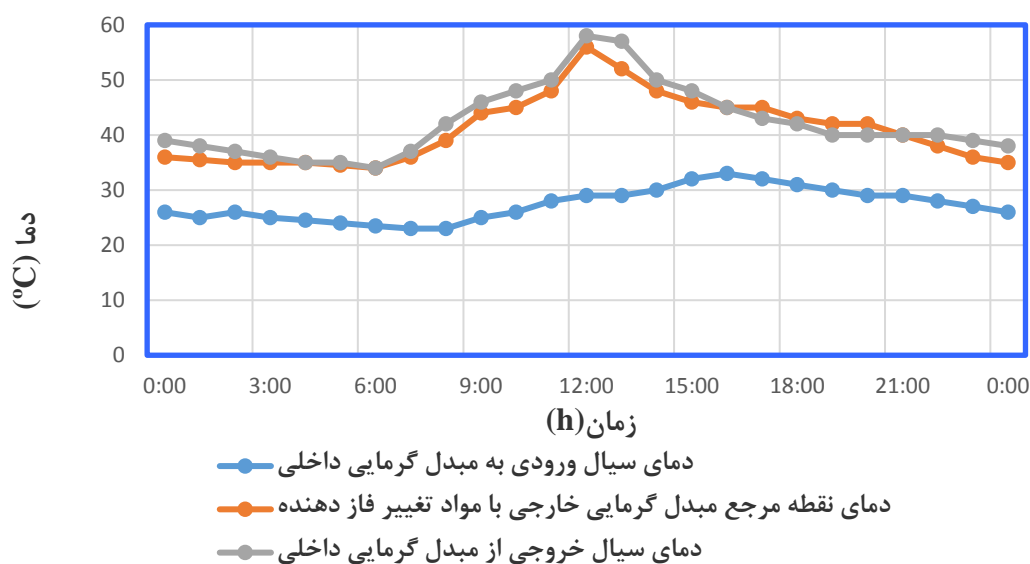


شکل ۱۰- نمودار دمایی سیال ورودی و دمای داخل مبدل گرمایی در روز اول بدون مواد تغییر فاز دهنده

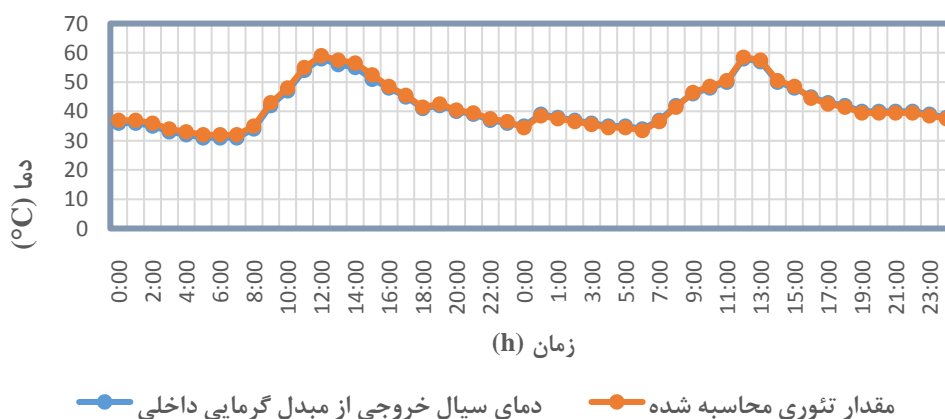
می‌برد و سپس افزایش می‌یابد. در محدوده ساعت ۱۶:۰۰ تا ۲۱:۰۰ دمای سیال خروجی کمتر از دمای نقطه مرجع مبدل گرمایی خارجی با مواد تغییر فاز دهنده است و این به دلیل فرآیند تخلیه گرمایی ماده تغییر فاز دهنده مبدل گرمایی خارجی است.

برای برآوردن قطعیت و اطمینان، دمای خروجی از مبدل گرمایی داخلی با استفاده از رابطه ۴ به صورت نظری محاسبه شد و با مقدار اندازه‌گیری شده به وسیله حسگرها در دو روز در شکل ۱۲ مقایسه شد. همانطور که نشان داده شده است انطباق دقیقی بین مقدار محاسبه شده و مقدار تجربی برقرار است.

شکل ۱۱ دمای آب شیرین ورودی به استخر خورشیدی و دمای ورودی به مبدل گرمایی خارجی و دمایی که داخل مبدل گرمایی خارجی با وجود مواد تغییر فاز دهنده دارد را در روز دوم، نمایش داده است. همانطور که مشاهده می‌شود از ساعت ۶:۰۰ تا ۱۲:۰۰ دمای سیال خروجی از مبدل داخلی یا دمای سیال ورودی به مبدل گرمایی خارجی به صورت تقریباً خطی در حال افزایش است ولی دمای مبدل گرمایی با مواد تغییر فاز دهنده در محدوده ساعت ۹:۰۰ تا ۱۱:۰۰ تقریباً ثابت است که این به دلیل تغییر فاز پارافین موجود در مبدل گرمایی است که در حال ذوب است و محدوده شارژ طبق نمودار شکل ۸ حدود دو ساعت زمان



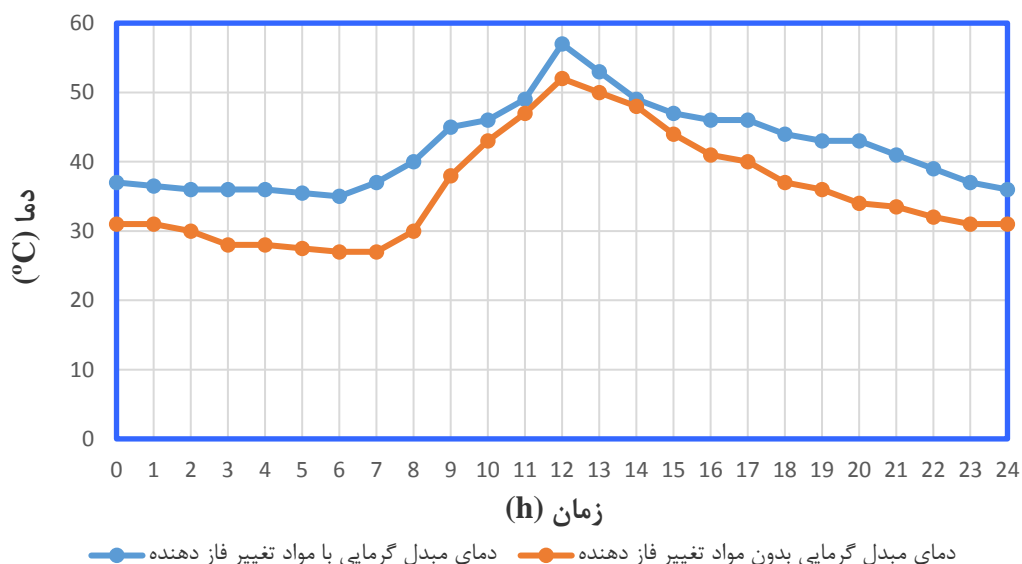
شکل ۱۱- نمودار دمای سیال ورودی و دمای داخل مبدل گرمایی در روز دوم با مواد تغییر فاز دهنده



شکل ۱۲- مقدار تئوری و تجربی دمای سیال خروجی از مبدل گرمایی داخلی در روز اول و دوم آزمایش

خارجی ثابت است زیرا دوره تخلیه از حدود ۴۵ درجه سلسیوس شروع می‌شود. فرایند تخلیه حدود ۱۲ ساعت طول می‌کشد. برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده، منحنی دما پس از ساعت ۴:۰۰ بعدازظهر روند نزولی آرام دارد، در حالی که سطح دما برای حالت با پارافین در مکان بالاتر قرار دارد. دلیل آن این است که، پس از این زمان، گرما از پارافین به دلیل تغییر فاز آزاد می‌شود. برای بررسی تفاوت دمایی مبدا گرمایی خارجی اطلاعات با استفاده از آزمون‌های تی در دو گروه مستقل از طریق نرم افزار SPSS 16 در سطح معناداری ($P < 0.05$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که دمای نقطه مرجع در مبدا گرمایی خارجی در زمان استفاده از پارافین و کس (میانگین = ۴۲ و انحراف معیار = ۳۶/۹) در مقایسه با عدم استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در مبدا گرمایی خارجی (میانگین = ۳۷/۸ و انحراف معیار = ۵۹/۸) از لحاظ آماری به طور معناداری بیشتر بوده است ($t = 2.0$, $P\text{-value} < 0.05$).

شکل ۱۰ توزیع دمای داخل مبدا گرمایی را در حالت معمولی و در شکل ۱۱ توزیع دمای داخل مبدا با مواد تغییر فاز دهنده هنگام کار را نشان می‌دهد. یک نقطه مشخص از مبدا گرمایی، که در فاصله یک سانتی‌متری به لوله‌های مبدا گرمایی بود به عنوان مرجع گزارش دما در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در روز اول بدون پارافین، دمای داخل مبدا گرمایی تقریباً ثابت است. بعد از حدود ساعت ۷:۰۰ صبح، دما به سرعت افزایش می‌یابد. این روند تا ظهر که حداکثر دمای سطح جاذب بدست می‌آید ادامه دارد. برای منحنی دیگر با مواد تغییر فاز دهنده، الگویی مشابه از ابتدا در ساعت ۷:۳۰ صبح، اما با سطح دمای بالاتر شکل می‌گیرد. در این زمان، وقتی دما به حدود ۴۶ درجه سلسیوس می‌رسد، مشخصات دما تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود. زیرا دوره شارژ پارافین شروع می‌شود. این فرآیند حدود دو ساعت طول کشید. سپس دما به سرعت پائین آمد. در ساعت ۳:۰۰ بعد از ظهر، دمای نقطه مرجع در مبدا گرمایی



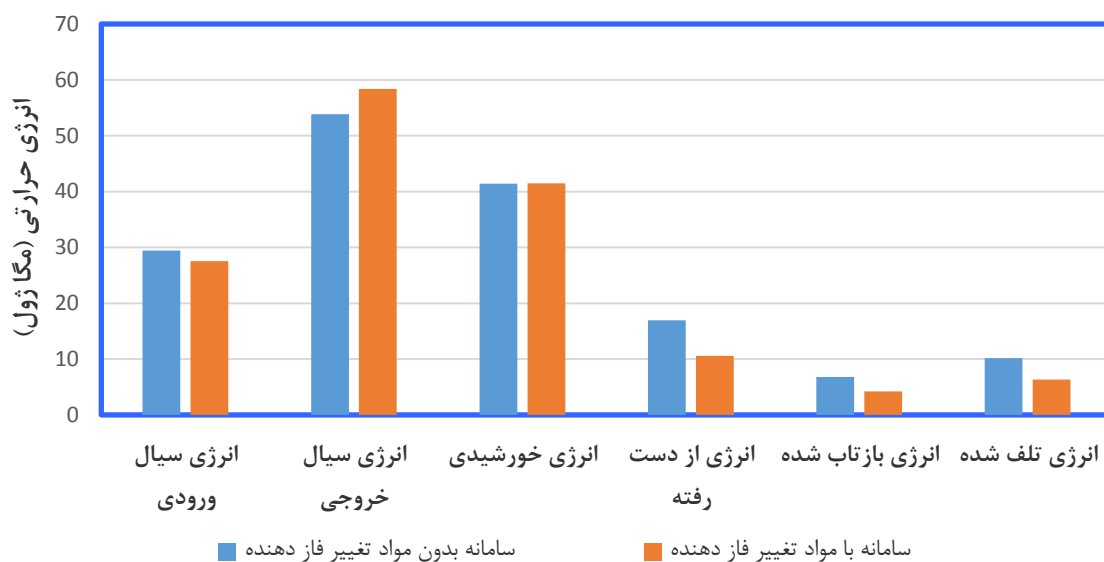
شکل ۱۳- مقایسه دمای نقطه مرجع در مبدا گرمایی خارجی در دو حالت با مواد تغییر فاز دهنده و بدون مواد تغییر فاز دهنده

شده است. انرژی سیال ورودی در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۲۹/۴ و ۲۷/۵ مگاژول

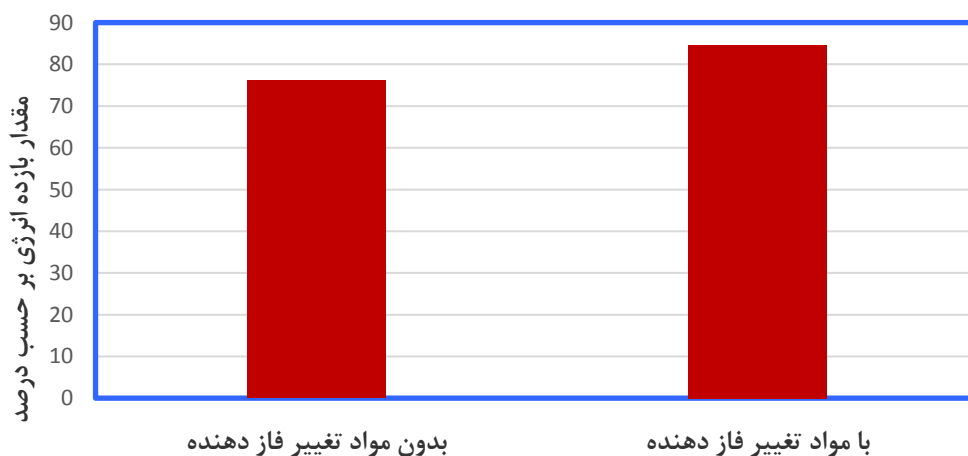
در شکل ۱۴ میزان جزءهای انرژی حرارتی برای هر کدام از آزمایش‌های سامانه در طول شبانه روز آورده

۱۶/۹ و ۱۰/۶ مگاژول بود که در حالت بدون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده ۶/۳ مگاژول انرژی به وسیله انرژی بازتاب شده از استخر یا تلف شده از دیواره ها و درون لایه‌های استخر از دسترس خارج شده است. در شکل ۱۵ بازده انرژی در حالت‌های مختلف آزمایش نشان داده شده است. بازده انرژی در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۰/۷۶٪ و ۶/۸۴٪ بدست آمد که در آزمایش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بازده انرژی بیشتری بدست آمد.

بدست آمد و این اختلاف به علت دمای آب ورودی بالاتر به سامانه بود. انرژی سیال خروجی در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۵۳/۸ و ۵۸/۸ مگاژول بود. انرژی خورشیدی تابیده شده به سامانه در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۴۱/۴ و ۴۱/۴ مگاژول بدست آمد. به علت مقدار یکسان تابش خورشید این مقدار در روزهای آزمایش تقریباً یکسان بدست آمد. انرژی از دست رفته از سامانه در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب



شکل ۱۴- میزان جزءهای انرژی در آزمایش سامانه با مواد تغییر فاز دهنده و بدون استفاده از آن



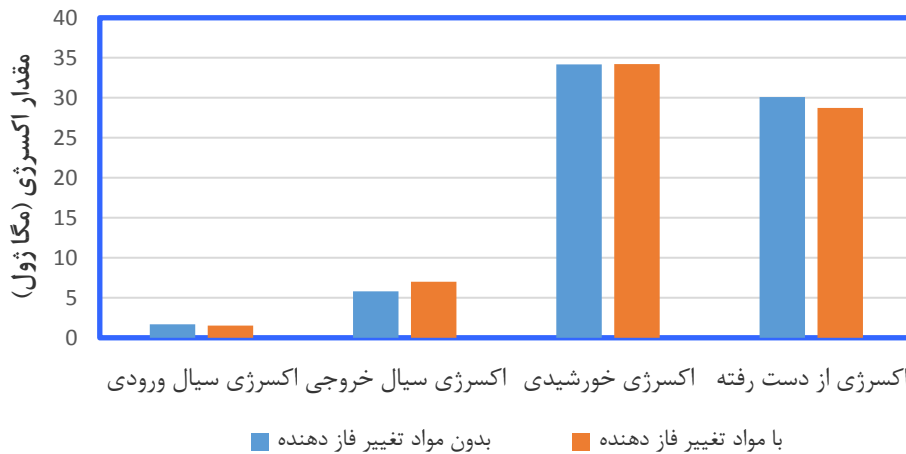
شکل ۱۵- بازده انرژی در آزمایش سامانه با مواد تغییر فاز دهنده و بدون استفاده از آن

مگاژول بدست آمد و مقدار اکسرژی سیال خروجی در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۵/۷

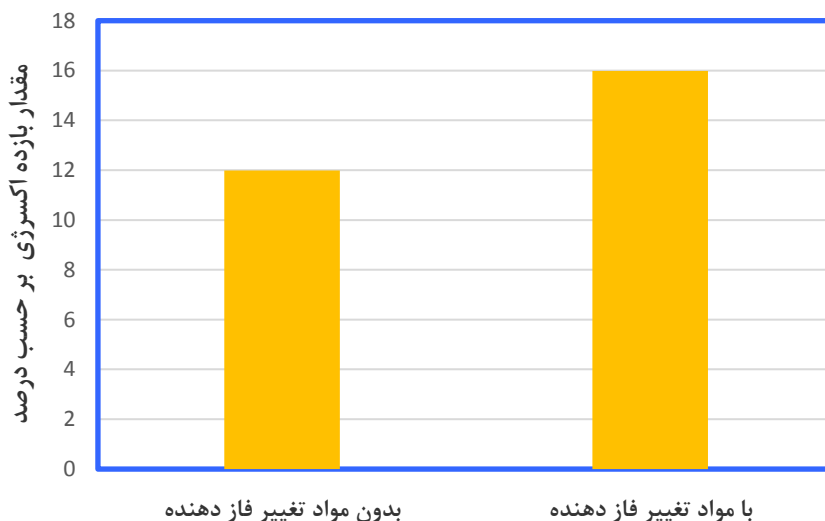
مقدار اکسرژی سیال ورودی به سامانه در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۱/۶ و ۱/۵

از مواد تغییر فاز دهنده و بدون آن نشان داده شده است. بازده اکسرژی یکی از عوامل مهم در طراحی و بهینه سازی یک سامانه است. در شکل ۱۷ مقدار بازده اکسرژی در سامانه استخر خورشیدی برای دو حالت مختلف آزمایش آورده شده است. بازده اکسرژی در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۱۱٪/۹ و ۱۵٪/۹ بدست آمد که در آزمایش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بازده اکسرژی بیشتری بدست آمد.

و ۶/۹ مگاژول اندازه گیری شد. همچنین اکسرژی ورودی به وسیله تابش خورشید در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۳۴/۱ و ۳۴/۲ مگاژول بدست آمد که تقریباً می توان مقدار آن را یکسان در نظر گرفت. مقدار اکسرژی از دست رفته که شامل مقدار اکسرژی تخریب شده و مقدار اکسرژی تلف شده است در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۳۰/۰ و ۲۸/۷ مگاژول اندازه گیری شد. در شکل ۱۶ مقدار جزء اکسرژی سامانه در حالت آزمایش با استفاده



شکل ۱۶- مقدار اکسرژی در آزمایش سامانه با مواد تغییر فاز دهنده و بدون استفاده از آن



شکل ۱۷- بازده اکسرژی در آزمایش سامانه با مواد تغییر فاز دهنده و بدون استفاده از آن

معمول از فناوری های مختلفی استفاده می شود که در این تحقیق از مواد تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی

نتیجه گیری کلی
برای افزایش راندمان عملکرد استخر خورشیدی به طور

هنگام غروب خورشید به علت آزاد کردن انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌دهد و در این تحقیق از ساعت ۱۶:۰۰ تا ساعت ۷:۰۰ دمای نقطه مرجع در مبدل گرمایی به ترتیب از دو درجه سلسیوس تا ده درجه سلسیوس بیشتر از حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده است. حداکثر دمای سطح جاذب در ساعت ۱۲:۰۰ بدست می‌آید که شدت تابش خورشید در حداکثر مقدار خود می‌باشد. این دما برای مواد تغییر فاز دهنده و بدون مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ۵۷ درجه و ۵۲ درجه سلسیوس می‌باشد. مقدار دمای نقطه مرجع مبدل گرمایی خارجی با روش آزمون‌تی مستقل برای دو روز کاری مورد بررسی قرار گرفت و آزمون اختلاف معنا داری با $P < 0.05$ نشان داد. بازده انرژی سامانه بدون PCM و با PCM به ترتیب ۷۶/۰٪ و ۸۴/۶٪ بدست آمد که در آزمایش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بازده انرژی بیشتری بدست آمد. همچنین بازده اکسرژی سامانه در آزمایش بدون PCM و با استفاده از PCM به ترتیب ۱۱/۹٪ و ۱۵/۹٪ بدست آمد که در آزمایش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بازده اکسرژی حاصل شد. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

خارجی استفاده گردید. در اولین گام، سامانه به عنوان یک استخر خورشیدی معمولی و بدون مواد تغییر فاز دهنده در مبدل گرمایی در نظر گرفته شد. دمای سیال ورودی و خروجی و دمای داخل مبدل گرمایی به وسیله دیتالاگر ثبت گردید. پس از آن، پارافین جامد به مبدل گرمایی اضافه شد. در این مطالعه اثر ذخیره گرمای نهان به صورت تجربی برای استخر خورشیدی بررسی شد. عملکرد گرمایی استخر خورشیدی با و بدون مواد تغییر فاز دهنده تحت شرایط مشابه ارزیابی گردید. دمای اندازه‌گیری شده‌ی لایه‌های مختلف استخر خورشیدی را در دو روز متوالی می‌توان یکسان در نظر گرفت. با محاسبه دمای ورودی به مبدل گرمایی خارجی به دو صورت نظری و تجربی با خطای حداکثر یک درجه سلسیوس انطباق خیلی خوبی بین نظر و تجربه بدست آمد. طول دوره تخلیه گرمایی پارافین واکس حدود ۱۲ ساعت طول کشید که به منظور تحلیل تفاوت دمایی مبدل گرمایی خارجی، داده‌ها با استفاده از آزمون‌تی در دو گروه مستقل از طریق نرم افزار SPSS 16 در سطح معناداری ($P < 0.05$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. استفاده از پارافین، دمای مبدل گرمایی خارجی را در

REFERENCES

- Abdullah, A. (2017). Measurements of the performance of the experimental salt-gradient solar pond at Makkah one year after commissioning. *Solar Energy*, 150(3), 212-219.
- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4), 313-332.
- Agyenim, F., Eames, P. & Smyth., M. (2009). A comparison of heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins and multitudes. in *Proceedings of ISES World Congress*, 83(9), 1509-1520.
- Al-Waeli, A., Sopian, K., Chaichan, M. (2017). Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 151, 693-708.
- Bahram, M. (2013). An over view of renewable energies in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(4) 198-208.
- Beik, A., Assari, M., Tabrizi, H. (2019). Transient modeling for the prediction of the temperature distribution with phase change material in a salt-gradient solar pond and comparison with experimental data. *Energy Storage*, 26(5), 101-111.
- Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: beyond the four as. *Energy Policy*, 75(10), 415-421.
- Colla. (2017). Nano-PCMs for Enhanced Energy Storage and Passive Cooling Applications. *Applied Thermal Engineering*, 110(9), 584-589.

- Date, A. (2013). Heat extraction from Non-Convective and Lower Convective Zones of the solar pond: A transient study. *Solar Energy*, 97, 517-528.
- Dehghan, A., Movahedi, A., Mazidi, M. (2013). Experimental investigation of energy and exergy performance of square and circular solar ponds. *Solar Energy*, 97, 273-284.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, (6th ed.). New Jersey: Wiley.
- Ganguly, S., Date, A., & Akbarzadeh, A. (2017). Heat recovery from ground below the solar pond. *Solar Energy*, 155, 1254–1260.
- González, D., Amigo, J., Lorente, S., Bejan, A., & Suárez, F. (2016). Constructal design of salt-gradient solar pond fields. *Energy Research*, 40(10), 1428-1446.
- Jaefarzadeh, M. R. (2006). Heat extraction from a salinity-gradient solar pond using in pond heat exchanger. *Thermal Engineering*, 26(16), 1858-1865.
- Tester, W. J., Drake, E. M., Driscoll, M. J., Gloy, M. W., Peter, W. A., (2005). *Sustainable energy: choosing among options*. (2nd ed.). London: The MIT Press.
- Khalilian, M. (2017). Experimental investigation and theoretical modelling of heat transfer in circular solar ponds by lumped capacitance model. *Applied Thermal Engineering*, 121, 737-749.
- Kumar, A., & Das, R. (2021). Effect of peripheral heat conduction in salt-gradient solar ponds. *Energy Storage*, 33, 50-62.
- Li, B. (2017). Experimental investigation and theoretical analysis on a mid-temperature solar collector/storage system with composite PCM. *Applied Thermal Engineering*, 124, 34-43.
- Liu, Z., Sun, X. (2005). Experimental investigations on the characteristics of melting processes of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement by fins. *Energy Conversion and Management*, 46(6), 959-969.
- Karakilcik, M., Dincer, I. (2008). Exegetic performance analysis of a solar pond. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 93-102.
- Petala, R. (2003). Exergy of undiluted thermal radiations. *Solar Energy*, 74, 469–488.
- Pillai, K. K., & Brinkworth, B. J. (1976). The storage of low grade thermal energy using phase change materials. *Applied Energy*, 2, 205-216.
- Sabetta, F., Pacetti, M., & Principi, P. (1985). An internal heat extraction system for solar ponds. *Solar Energy*, 34(4-5), 297-302.
- Satish, & Satish Kumar. (2015). Effective study on solar pond and its various performances. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Innovative Research in Engineering and Technology*, 9-11 Apr., Anna University, Tamil Nadu, India, pp. 463-474.
- Sharam, A., Tyagi, V. V., Chen D, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy*, 13(2), 318-345.
- Tundee, S., Terdtoon, P., Singh, R., & Akbarzadeh, A. (2010). Heat extraction from salinity-gradient solar ponds using heat pipe heat exchangers. *Solar Energy*, 84(9), 1706-1716.
- Valderrama, C., Gibert, O., Arcal, J., Solano, P., Akbarzadeh, A., Larrotcha, E., & Cortina, J. L. (2011). Solar energy storage by salinity gradient solar pond: Pilot plant construction and gradient control. *Desalination*, 279(1), 445-450.
- Victor, D., & Kennel, C. F. (2014). Climate policy: ditch the 2°C warming goal. *Nature*, 514, 30-31.
- Zangrando, F. (1980). A simple method to establish salt gradient solar ponds. *Solar Energy*, 25(5), 467-470.