

ارزیابی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فاز دهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
sina.toosi18@gmail.com
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
zahmatkesh5310@mshdiau.ac.ir
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
nejati3744@mshdiau.ac.ir

سید سینا ادیبی طوسی

حمید رضا گشایشی*

ایمان زحمتکش

وحید نجاتی

چکیده

محدودیت دسترسی به منابع آب شیرین کمبود آب را به عنوان یک بحران مطرح کرده است. از این رو آب شیرین کن‌های خورشیدی امروزه مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی که دارای ۲۸ پله به ارتفاع ۳۰ میلی‌متر، عرض ۱۱۰ میلی‌متر و طول ۸۴۰ میلی‌متر می‌باشد، در این تحقیق طراحی، ساخته و استفاده شده‌است. به منظور افزایش نرخ تولید روزانه، دستگاه در ۴ حالت مختلف (۱ ساده، ۲ همراه با ماده تغییر فاز دهنده (PCM)، ۳ همراه با نانو ماده تغییر فاز دهنده (NPCM) ترکیبی، ۴ همراه با NPCM ترکیبی تحت میدان مغناطیسی، آزمایش و بهینه سازی شده است. از ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) و نانو ماده تغییر فاز دهنده (اکسید گرافن + اکسید آهن) به صورت ۵۰٪ ترکیبی به عنوان منبع ذخیره انرژی گرمایی به جهت ادامه شیرین سازی آب پس از غروب خورشید، استفاده شده است. پس از انجام آزمایشات، مشخص شد حالت چهارم آزمایش یعنی نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی نسبت به حالت ساده ۹۸ درصد افزایش نرخ تولید داشته است.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، ماده تغییر فاز دهنده، نانو هیبریدی، میدان مغناطیسی، انرژی خورشیدی، انرژی تجدید پذیر.

Experimental assessment of stepped solar still with hybrid NPCM under magnetic field

S. S. Adibi Toosi
H. R. Goshayeshi
I. Zahmatkesh
V. Nejati

Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Abstract

Limited access to fresh water sources has raised water shortage as a crisis. Therefore, solar desalinations have received special attention today. A stepped solar desalination device which has 28 steps with a height of 30 mm, a width of 110 mm and a length of 840 mm has been designed, built and used in this research. In order to increase the daily production rate, the device has been tested and optimized in 4 different modes: first mode) simple, second mode) with phase change material (PCM), third mode) with Hybrid Nano phase change material (NPCM), fourth mode) with Hybrid NPCM under magnetic field. The phase change material and Hybrid Nano phase change material have been used as a source of thermal energy storage to continue the desalination of water when the sun sets. After conducting the tests, it was found that the fourth mode of the test, i.e. the Hybrid Nano phase change material under the magnetic field, had a 98% increase in the production rate compared to the simple mode.

Keywords: Stepped solar still, Phase change material, Hybrid Nano, Magnetic field, Solar energy, Renewable energy.

۱- مقدمه

عدم نیاز به تجهیزات جانبی برای راه اندازی، عدم نیاز به منبع انرژی متداول، امکان پذیر بودن ساخت و تعمیر محلی، هزینه پایین و امکان تهیه آب شرب حتی از آب مقطر اشاره نمود [۲]. انرژی گرمایی را می‌توان به دو روش گرمای محسوس و نهان در مواد و سیستم‌های مختلف ذخیره کرد. یکی از مهمترین و رایج ترین روش-های ذخیره سازی انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. این مواد در حین تغییر فاز، انرژی گرمایی را ذخیره نموده و در مواقع لزوم آزاد می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده دارای بیشترین گرمای نهان هستند ولی مشکلی که باعث می‌شود این مواد دارای نرخ شارژ و تخلیه پایینی باشند، پایین بودن ضریب رسانایی گرمایی این مواد است

نقش آب در زندگی انسان‌ها و سایر موجودات زنده بسیار با اهمیت است. در میان آب‌هایی که بر روی کره زمین وجود دارد آب شیرین از همه مهم‌تر است به همین دلیل تبدیل آب شور به آب آشامیدنی امری حیاتی برای انسان‌ها محسوب می‌شود. دستگاه آب شیرین کن خورشیدی می‌تواند عوامل بیماری زا، نمک‌ها، فلزات سنگین و غیره را از آب شور جدا کند [۱]. بزرگترین و بارزترین فایده انرژی خورشیدی در مقایسه با شکل‌های دیگر انرژی، پاک بودن آن است همچنین تهیه این نوع از انرژی هیچگونه آلودگی محیطی ندارد. از مزایای آب شیرین کن‌های خورشیدی می‌توان به تولید آب خالص،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۸/۲۳

که محققان با به کارگیری فلزات و نانومواد با ضریب رسانایی گرمایی بالا سعی در رفع این مشکل دارند [۳].

PCMs^۱ ها یا مواد تغییر فاز دهنده به عنوان مواد ذخیره کننده انرژی شناخته می‌شوند. به طور کلی مواد می‌توانند به سه شکل انرژی را در خود ذخیره کنند؛ انرژی شیمیایی، انرژی نهان و انرژی محسوس. PCM ها در دسته دوم قرار می‌گیرند [۴]. مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به دو دسته آلی و غیر آلی تقسیم نمود. PCM های آلی را می‌توان به گروه پارافین ها (ذخیره الکانها) و غیر پارافین ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل ها و گلیکولیک اسیدها تقسیم بندی نمود [۵]. PCM های غیر آلی عموماً به دو دسته نمک‌های هیدراته و فلزات تقسیم‌بندی می‌شوند [۶]. پارافین نوعی ماده شیمیایی بوده که یک ترکیب هیدروکربنی سیر شده است. شکل ظاهری آن در حالت مایع، مایعی سفید شفاف بوده و در حالت جامد می‌توان آنرا به صورت تخته‌ای یافت. موم پارافین اغلب مخلوطی از زنجیره مستقیم n-alkyl $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ است [۷]. جدول ۱ خواص پارافین را نشان می‌دهد. به منظور بالا بردن آب داخل تشتک آب شیرین کن روش های مختلفی از جمله نانوذرات، PCM، گرم کننده الکتریکی، گردآورنده خورشیدی و گرم کننده هوا وجود دارد [۸].

جدول ۱- خواص پارافین [۹]

مقدار	خاصیت
46-63	دمای نقطه ذوب (°C)
0.22	رسانایی گرمایی (W/m °C)
2.01/2.2	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kg °C) جامد/مایع
830/930	چگالی جامد/مایع (kg/m ³)
190.0	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)

۱-۱- نانوذره اکسید گرافین

کربن، چهارمین عنصر فراوان در طبیعت است و یکی از عناصر بسیار ضروری برای حیات انسان است. این عنصر دارای ساختارهایی متفاوتی است که به آن‌ها آلوتروپ‌های کربن می‌گویند. معمول‌ترین شکل کریستالی اتم کربن، گرافیت و الماس است. گرافیت، آلوتروپ سه بعدی کربن بوده که دارای ساختار لایه لایه است و در آن اتم‌های کربن چهار ظرفیتی از طریق سه پیوند کووالانسی به سه اتم کربن دیگر متصل شده‌اند و یک ساختار شبکه‌ای شش گوشه‌ای را تشکیل می‌دهند. به هر کدام از این لایه‌ها، ورقه یا لایه گرافنی گفته می‌شود [۱۰]. هر ورقه به طور موازی روی ورقه دیگر قرار گرفته و تولید یک شبکه منظم با توالی AB را می‌نماید و بدین ترتیب چهارمین الکترون ظرفیت نیز از طریق ایجاد پیوند واندروالسی باعث اتصال ورقه‌ها به یکدیگر می‌شود با توجه به ضعیف بودن پیوندها بین ورقه‌های گرافنی (پیوندهای واندروالسی)، ورقه‌های فوق می‌توانند براحتی روی همدیگر بلغزند [۱۱]. گرافن، یک لایه از اتم‌های مرتب شده کربن با هیبرید SP2 در یک لایه زنبوری شکل و شبکه کریستالی دو بعدی (2D) است و اولین بار در سال ۲۰۰۴ میلادی سنتز شده است.

۱-۲- نانو اکسید آهن (Fe₃O₄) یا مگنتیت

در میان نانوذرات، نانوذرات اکسید آهن نمونه‌ای از نانومواد پرکاربرد است؛ شانزده فاز برای اکسیدهای آهن وجود دارد. ویژگی این ترکیبات، شکل سه ظرفیتی آهن، حلالیت پایین و رنگ خاص آن‌ها است. در بین اکسیدهای آهن نانوذرات مگنتیت (Fe₃O₄) به دلیل خاصیت سوپر پارامگناطیسی، دمای کوریه پایین، غیر سمی بودن و... بیشتر از سایر اکسیدهای آهن مورد توجه قرار گرفته است. مگنتیت دارای ساختار کریستالی اسپینل معکوس است که در آن هر سلول واحد شامل ۳۲ اتم اکسیژن است. اتم‌های اکسیژن موجود در ساختار مگنتیت در آرایش ساختاری مکعبی وجوه ۶ پر قرار دارند. در این ساختار کریستالی یون‌های Fe (II) و نیمی از یون‌های Fe (III) محل‌های اکتاهدال را اشغال می‌کنند. نصف دیگر یون‌های Fe (III) در محل تتراهدرال قرار می‌گیرند. اتم‌های آهن دو ظرفیتی به دلیل داشتن انرژی پایداری میدان بلور (CFSE) بالا، ترجیح می‌دهند تا محل‌های اکتاهدال را اشغال کنند [۱۲].

خسروچردی و همکاران [۱۳] نیز استفاده از نانوسیال اکسید گرافن در گردآورهای خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند که دریافتند با استفاده از این نانوسیال بر پایه آب دیونیزه راندمان گردآور ۷۵/۰۷ درصد خواهد بود در حالی که راندمان دستگاه برای سیال پایه تنها ۵۸/۲۵ بوده است.

در یک مدل ریاضی گچکاران و همکاران [۱۴] به شبیه‌سازی یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای همراه با PCM در زیر آن با استفاده از مدل ژنتیک پرداختند. آنها از واکس پارافین به عنوان PCM استفاده کردند و نتیجه گرفتند هرچه PCM رسانایی گرمایی بالاتری داشته باشد، میزان تولید آب بیشتر خواهد بود و تولید آب شیرین کن را با استفاده از این روش بهبود بخشیدند.

یکی از عوامل تاثیر گذار روی بازده آب شیرین کن خورشیدی شکل سطح جاذب و استفاده از پره‌هایی روی آن است. شلابی و همکاران [۱۵] از سطح جاذب V شکل و پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای ساده استفاده نمودند تا تاثیر آن را روی این نوع آب شیرین کن بررسی نمایند. پس از آزمایشات صورت گرفته و مقایسه نتایج مشاهده کردند که آب شیرین کن تک حوضچه‌ای همراه با سطح جاذب V شکل و استفاده از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در مقایسه با نوع ساده آن ۱۲ درصد بازده بالاتری خواهد داشت.

یکی از انواع آب شیرین کن خورشیدی، آب شیرین کن خورشیدی هرمی است که مزیت آن این است که با زوایای افق کم نیز می‌تواند جذب تابش مناسبی داشته باشد. از این رو، کابیل و همکاران [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی هرمی همراه با صفحه جاذب V شکل و ماده تغییر فاز دهنده در زیر سطح جاذب پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده کردند استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و سطح جاذب V شکل تا ۸۷ درصد باعث بهبود عملکرد آب شیرین خورشیدی هرمی ساده می‌شود.

یوسف و همکاران [۱۷] از پره به منظور افزایش رسانایی گرمایی پارافین واکس در آب شیرین کن خورشیدی ساده در سال ۲۰۱۹ استفاده نمودند و نتیجه گرفتند استفاده از پره به ترتیب در حالت بدون

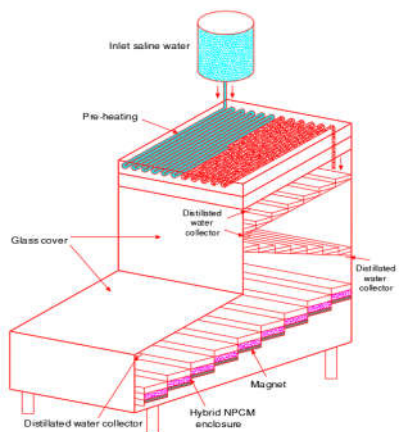
^۱ Phase Change Materials

بود. همچنین بیشترین افزایش بازده در درصد حجمی ۰/۵ درصد حاصل شد.

همان‌گونه که اشاره شد فعالیت‌های فراوانی در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام پذیرفته‌است اما چه در داخل و چه در خارج کشور از نانو ماده تغییر فازدهنده هیبریدی همراه با میدان مغناطیسی در آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی تحقیقی انجام نشده‌است لذا در این پژوهش، به مطالعه‌ی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی و بررسی تاثیر استفاده از نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی بر روی بازده دستگاه و همچنین استفاده از میدان مغناطیسی به منظور تاثیر بر روی NPCM پرداخته شده است. در این تحقیق از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پایه و همچنین از دو نانوذره اکسید گرافن و اکسید آهن یا مگنتیت به صورت درصد ترکیبی ۵۰ درصد در پارافین در محفظه‌های مستطیلی استفاده شده است. همچنین از صفحات آهنربایی به عنوان میدان مغناطیسی استفاده شده است.

۲- مراحل ساخت

در این بخش مراحل و روش ساخت دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی و نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی مختلف مورد نظر را شرح خواهیم داد. شکل ۱ طرحواره‌ای از دستگاه جدید ساخته شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره آب شیرین‌کن خورشیدی تحت آزمایش

۲-۱- بدنه دستگاه

بدنه دستگاه از ورق گالوانیزه با قطر بیست و پنج میلی متر ساخته شده است و دلیل آن مقاومت نسبی گالوانیزه در مقابل خوردگی و همچنین رسانایی گرمایی آن است. ورق‌های رول فرم گالوانیزه با ضخامت های ۱۸ صدم میلی متر تا ۶ میلی متر و با دو عرض ۱۰۰ سانتی متر و ۱۲۵ سانتی متر تولید می‌شوند. ورق‌های فابریک گالوانیزه هم به دو اندازه استاندارد ۱۰۰۰×۲۰۰۰ میلی متر و ۱۲۵۰×۲۵۰۰ میلی متر تولید می‌شوند. جدول ۲ مشخصات دستگاه و شکل ۲ دستگاه تحت آزمایش را نشان می‌دهد.

PCM و همراه با PCM ۷ و ۱۷ درصد موجب افزایش تولید خواهد شد.

الباجویی و همکاران [۱۸] به بررسی نانوذره اکسید آلومینیوم Al_2O_3 در ماده تغییر فاز دهنده پرداختند و مشاهده نمودند با افزایش درصد حجمی نانوذره در PCM نرخ ذوب آن افزایش می‌یابد به طوری که بازده ذخیره انرژی نهان آن ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

شوگلا و همکاران [۱۹] از اکسید روی ZnO به عنوان نانوذره با درصد حجمی ۰/۱ در سیال آب در سال ۲۰۲۰ در یک آب شیرین‌کن خورشیدی استفاده نمودند و در نهایت افزایش ۱۹/۲ درصدی در نرخ تولید را نتیجه گرفتند.

چن و همکاران [۲۰] از نانو سیال اکسید آهن در آب شیرین‌کن خورشیدی تک حوضه‌ای استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که نرخ تبخیر در بازه 0.0025-0.4 برای نانو اکسید آهن 24.9-76.7 درصد بهبود خواهد یافت.

شارشیر و همکاران [۲۱] از کربن سیاه به عنوان نانو ذره با کسر حجمی ۱/۵ درصد در آب داخل آب شیرین‌کن پلکانی استفاده نمود و شاهد افزایش ۸۰٪ درصدی نرخ تولید بود.

شانموگان و همکاران [۲۲] از اکسید تیتانیوم و اکسید کروم به عنوان نانوسیال هیبریدی در آب شیرین‌کن خورشیدی ساده در سال ۲۰۲۰ استفاده نمودند که شاهد افزایش ۵۷ درصدی میزان تولید دستگاه در طول یک شبانه روز شدند.

کابییل و همکاران [۲۳] به استفاده از اکسید گرافن در پارافین به عنوان ماده تغییر فازدهنده در آب شیرین‌کن خورشیدی ساده پرداختند و نتیجه گرفتند میزان تولید روزانه بدون PCM، 35.5 kg/day، با PCM 59.2 kg/day و با NPCM 62.5 kg/day خواهد بود که افزایش ۳۴ درصدی تولید را در پی خواهد داشت.

پارسا و همکاران [۲۴] از نقره به عنوان نانوذره در آب شیرین‌کن خورشیدی ساده همراه با چگالنده در سال ۲۰۲۰ استفاده نمودند و افزایش ۲۶ درصدی در نرخ تولید نتیجه شد.

کومار و همکاران [۲۵] از اکسید مس با کسرهای حجمی مختلف از ۰ تا ۲ درصد حجمی به عنوان نانوذره جهت بهبود رسانایی گرمایی در پارافین استفاده در سال ۲۰۲۰ استفاده نمودند و نتیجه گرفتند در بهترین حالت یعنی ۲٪ کسر حجمی تا ۱۷۲ درصد رسانایی گرمایی پارافین بهبود خواهد یافت.

عبدالله و همکاران [۲۶] از یک آب شیرین‌کن خورشیدی ساده همراه با بازتابنده و اکسید مس به عنوان نانوذره در پارافین استفاده نمودند و نتیجه گرفتند تنها با اضافه نمودن اکسید مس تا ۳۷ درصد افزایش تولید در نرخ روزانه خواهیم داشت.

دیواگار و همکاران [۲۷] از صفحات گرافیت و آهنربا در آب شیرین‌کن خورشیدی ساده استفاده نمودند. با توجه به نتایج حاصل شده، نرخ تولید روزانه ۲۰٪ نسبت به آب شیرین‌کن ساده افزایش تولید خواهد داشت.

شجاعی زاده و همکاران [۲۸] به بررسی بهبود بازده گرمایی و انتقال گرما در گردآورنده خورشیدی لوله‌ای با استفاده از نانوسیال آهن اکسید تحت تاثیر میدان مغناطیسی پرداختند. نتیجه این تحقیق بهبود بازده گرمایی نانوسیال اکسید آهن تحت قرار گرفتن در میدان مغناطیسی

جدول ۲- مشخصات آب شیرین کن پلکانی

ابعاد حوضچه، mm	1600×910
ابعاد هر پله، mm	110×840
ارتفاع آب در هر پله، mm	20
ضخامت عایق، mm	15
شیب پوشش شیشه ای، درجه	15
ضخامت شیشه، mm	3
ابعاد محفظه PCM، mm	20×110×840
تعداد محفظه PCM	7

۲-۲- پلکان‌ها

پلکان در دستگاه آب شیرین کن نقش بسیار مهمی دارد، چرا که آب با عبور از سطح آن به دمای مورد نیاز جهت تبخیر رسیده و با عبور از پله‌ها به صورت یکی پس از دیگری به مرور تبخیر می‌شود تا به پایین ترین پلکان رسیده و به خارج از دستگاه هدایت شود. جنس پلکان نیز از گالوانیزه بوده و پوششی از رنگ مشکی مات جهت جذب بیشتر گرما حاصل تابش خورشید بر روی آن قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از کانالیزه شدن آب و همچنین حرکت آب بر روی تمام سطح پلکان لبه ای به ارتفاع دو سانتیمتر بر روی قسمت جلویی پلکان قرار گرفته تا مانع از ریزش آب در قسمت‌های میانی پلکان شود و آب با برخورد با این لبه‌ها به سمت انتهایی پلکان هدایت و از طریق شکاف مخصوصی که در انتهای هر پله ایجاد شده بر روی پله پایینی می‌ریزد و با طی طول پله در آن سوی پلکان به سطح پایین تر منتقل می‌شود. عرض و ارتفاع هر پله با توجه به شیب ده درجه پلکان‌ها محاسبه و تعیین شد که با در نظر گرفتن نحوه سرعت مورد نیاز حرکت آب و دبی آب ورودی ارتفاع هر پله ۲ سانتی‌متر و عرض آن ۱۱ سانتی‌متر تعیین شد. با توجه به طول کل دستگاه و تعداد سطوح پلکانی که سه سطح بوده؛ به طوری که دو سطح با هم برابر و یک سطح طولانی تر می‌باشد. این سطوح به ترتیب در داخل دستگاه طوری قرار می‌گیرند که آب در پایان عبور از هر سطح بر روی سطح پایین تر می‌ریزد تا به محل خروج رسیده و از آن خارج شود.



شکل ۲- آب شیرین کن خورشیدی پلکانی تحت آزمایش

۳-۲- شیشه

برای ایجاد شرایط گلخانه‌ای که باعث به وجود آمدن بخار در محفظه دستگاه می‌شود، از شیشه برای سطح روی سطح پلکانی پایین استفاده می‌شود. شیب مورد نظر برای آن ۱۵ درجه است. این شیشه علاوه بر عبور دادن اشعه خورشید کار تقطیر بخار تولیدی را نیز انجام می‌دهد. ضخامت مناسب شیشه برای این کار ۳ میلی‌متر می‌باشد. در قسمت انتهایی شیشه مورد استفاده یک عدد جمع کن نصب شده تا آب حاصل از تقطیر را به بیرون دستگاه هدایت کند. برای قرار گرفتن شیشه بر روی دستگاه از یک رگال آلومینیومی که یک درز گیر لاستیکی در آن تعبیه شده استفاده شده است. این درزگیر هم کار آب بندی سطح زیر شیشه را انجام می‌دهد، و هم مانع از فشار و شکستن شیشه در اثر فشار عمودی می‌شود.

۴-۲- سر شیرهای خروجی آب از دستگاه

برای جمع آوری آب شیرین خروجی از دستگاه تعداد ۴ عدد سرشیرهایی در جداره محفظه و در محل قرار گیری جمع کن‌ها بسته می‌شود تا آب خروجی از آن خارج شده و توسط شیلنگ یا لوله به ظرف مخصوص منتقل شود (شکل ۱).

۵-۲- محفظه های نگهدارنده مواد تغییر فاز دهنده

به منظور ذخیره سازی انرژی خورشیدی و استفاده از آن پس از غروب خورشید، از نانو مواد تغییر فاز دهنده در زیر دستگاه استفاده می‌کنیم. به این منظور زیر ۷ پله ابتدایی پلکان‌های آب شیرین کن خورشیدی (قسمت تبخیر کن) یک محفظه مستطیلی با ارتفاع ۲ سانتی متر و طول ۹۰۰ میلی متر (طول هر پله) و عرض ۱۱۰ میلی متر (عرض هر پله) و به منظور انتقال گرما بیشتر و استحکام کافی از ورق گالوانیزه به قطر ۰/۵ میلی متر ساخته شده است (شکل ۳).

هر محفظه مستقلاً قابلیت جدا شدن کامل از سیستم را داشته و بر روی هر محفظه سرشیری با اندازه استاندارد ۱۶ میلی‌متر می‌باشد که قابلیت باز و بسته شدن به منظور ورود و خروج مواد را داراست. برای جلوگیری از اتلاف انرژی زیر هر پله با عایق گرمایی الاستومری با چگالی ۹ که یکی از به روز ترین عایق‌های گرمایی- برودتی به شمار می‌رود پوشیده شده است تا هم انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده از زیر پله‌ها هدر نرود و همچنین بادهای با سرعت بالا که از زیر پلکان‌ها عبور می‌کنند و عامل خنک کنندگی محفظه مواد تغییر فاز دهنده و به تبع صفحه جاذب هستند؛ نشوند.



شکل ۳- محفظه های نگهدارنده PCM نصب شده زیر هر پله

$$h_{fg} = 10^3 [2501.9 - 2.40706 \times T_w + 1.192217 \times 10^{-3} \times T_w^2 - 1.5862 \times 10^{-5} \times T_w^3] \quad (2)$$

به منظور تعیین خطای اندازه گیری، سه داده آزمایشگاهی اندازه گیری شده جمع آوری گشته و میانگین حسابی داده ها محاسبه و به عنوان داده های نهایی استفاده شده است. مقدار خطای احتمالی داده ها از فرمول زیر محاسبه شده است [۳۰]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (3)$$

در جایی که:

$$\sigma = \left[\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

این فرمول در تحلیل نتایج تجربی به صورت زیر استفاده شده است:

$$\sigma_m = 0.577 \sigma \quad (6)$$

درصد خطای اندازه گیری داده های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\chi = \frac{100 \sigma_m}{\bar{x}} \quad (7)$$

به عنوان نمونه چند مورد از مقادیر متوسط درصد خطای اندازه گیری داده های اندازه گیری شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- خطای اندازه گیری دما اجزا آب شیرین کن خورشیدی

شماره	دمای نقاط	خطای اندازه گیری
۱	آب	٪ ۰/۰۲
۲	تشتک	٪ ۰/۰۱
۳	سطح داخلی شیشه	٪ ۰/۰۱
۴	سطح خارجی شیشه	٪ ۰/۰۱

۴- آزمایش و نتایج

۴-۱- طرح اول: دستگاه آب شیرین کن خورشیدی

معمولی

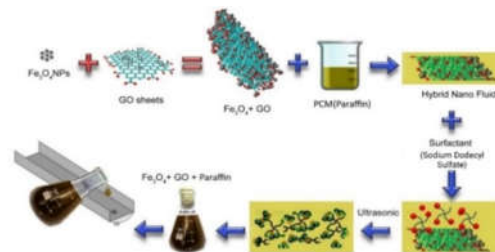
آزمایشات طی دو روز (type 1 و type 2) که هوا آفتابی و صاف بود، از ساعت ۹ صبح آغاز گردید. اندازه گیری ها به صورت ساعتی و در دماهای مختلف در بازه زمانی ۹ تا ۱۸ در بازه زمانی آزمایشات انجام گرفت. شکل ۵ و ۶ نتایج آزمایشات را طی دو روز آزمایش نشان می دهد.

همانگونه که اشاره شد آزمایشات به منظور جلوگیری از خطای کمتر طی دو روز مختلف انجام پذیرفت. دمای آب و پوشش شیشه ای که اصلی ترین پارامترها به منظور تقطیر و تهیه آب شیرین در آب شیرین کن های خورشیدی است، در شکل ۵ آمده است.

میزان دقت دستگاههایی که در این تحقیق از آنها به منظور اندازه گیری پارامترهای مختلف از جمله دمای قسمت های مختلف آب شیرین کن، میزان تابش خورشید و میزان تولید آب شیرین استفاده شده، در جدول ۴ آمده است.

۲-۶ سنتز نانوذرات Fe₃O₄/GO

برای سنتز نانوذرات هیبریدی گرافن اکسید-آهن اکسید، نانوذره اکسید گرافن تهیه شده از شرکت مرک آلمان را با روش هومر با نمک های آهن طبق روش زیر واکنش داده و نانوذرات مورد نظر سنتز می گردد. برای این منظور، ۰/۵ گرم اکسید گرافن (GO) در آب مقطر به مدت ۲ ساعت اولتراسونیک می گردد. سپس میزان 4 mmol FeCl₃.6H₂O و 2 mmol FeSO₄.7H₂O تحت اولتراسونیک به آن افزوده و برای یک ساعت ادامه می یابد. محلول NH₄OH به میزان ۱/۶۵ مول قطره قطره تحت همزدن شدید به مدت ۲ ساعت به آن افزوده می شود تا به pH=10 برسد. رسوب جامد فیلتر شده و با آب و اتانول شسته شده تا به pH=7 برسد. سپس به مدت یک ساعت در اتانول خشک غوطه ور شده و در نهایت تحت دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در آن خشک می گردد. خلاصه ای از فرآیند تهیه Fe₃O₄/GO در طرح شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- طرحواره تهیه نانوسیال هیبریدی Fe₃O₄ + GO + Paraffin

۲-۷-تهیه نانوسیال

روش دو مرحله ای برای تهیه نانوسیال مورد استفاده قرار گرفت. نانوذرات با درصد وزنی ۰/۱ در محلول پارافین به عنوان سیال پایه پخش شده تا سوسپانسیونی از نانوذرات به دست آمد، سپس این سوسپانسیون همزده و تحت امواج فراصوت 200 W، 60 kHz با استفاده از دستگاه اولتراسونیک (Elmasonic S 30H., German) برای مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت، در این مرحله، محلول سدیم دودسیل سولفات (SDS)، شامل حل شده در پارافین به آن افزوده می گردد و دوباره برای مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار می گیرد. برای بررسی تاثیر SDS بر پایداری به صورت چشمی میزان ته نشینی نانوذرات در طول زمان های مختلف بررسی شد.

۳- معادلات حاکم

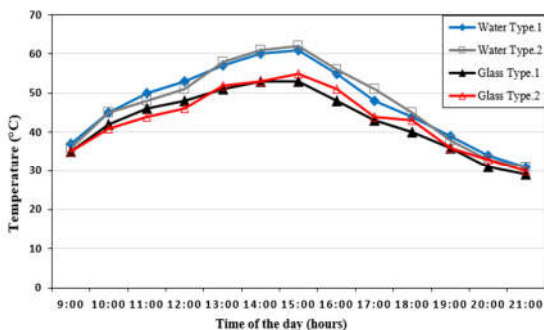
بازده روزانه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی را می توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد. این معادله به مجموع نرخ تولید روزانه $(\sum \dot{m}_p)$ ، گرمای نهان متوسط (h_{fg}) ، مساحت سطح جاذب (A_s) ، و مجموع شدت تابش خورشیدی $(\sum I(t))$ بستگی دارد [۲۹]:

$$\eta_{th} = \frac{\sum \dot{m}_p \times h_{fg}}{A_s \times \sum I(t)} \quad (1)$$

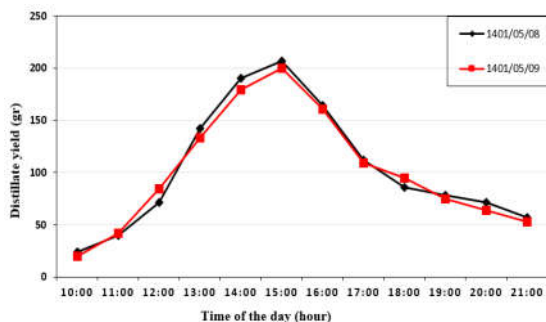
گرمای نهان متوسط (h_{fg}) به دمای متوسط آب حوضچه (T_w) بستگی دارد و با معادله زیر قابل محاسبه است [۲۹]:

جدول ۴- دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری آزمایش

شماره	دستگاه	دامنه	دقت
۱	سولارمتر	0 – 1000 W/m ²	±0.01 W/m ²
۲	ترموکوپل	0 °C-300 °C	±1 °C
۳	دماسنج لیزری	0 °C-150 °C	±0.1 °C
۴	بشر مدرج	0-2000 ml	±5 ml



شکل ۷- دمای پوشش شیشه ای و آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۸ و ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

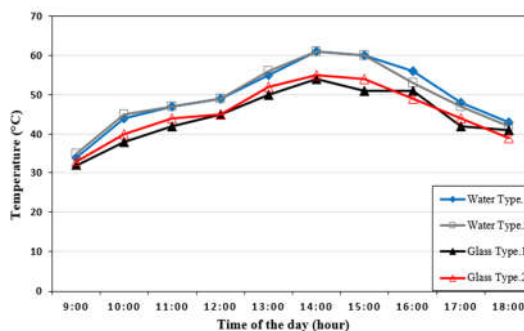


نمودار ۸- نرخ تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۸ و ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

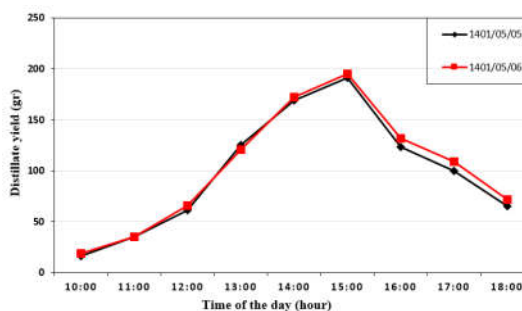
با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش دوم که از ماده تغییر فاز دهنده به عنوان منبع ذخیره انرژی گرمایی در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده استفاده شد، نرخ تولید روزانه متوسط ۱۲۳۵ گرم را نشان می‌دهد که نسبت به آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده ۳۳۲ گرم افزایش یافته است که ۳۷ درصد نسبت به حالت اولیه آزمایش بیشتر است. این افزایش نرخ تولید به دو دلیل ادامه شیرین-سازی آب پس از غروب خورشید و همچنین افزایش دمای تشتک و آب داخل آن، حادث شده است و بازده دستگاه به ۹/۶ درصد رسیده است.

۴-۳- طرح سوم: دستگاه آب شیرین کن خورشیدی همراه با NPCM هیبریدی

آزمایشات در این مرحله نیز طی دو روز به منظور کمینه نمودن خطاها در هوای کاملاً آفتابی از ساعت ۹ صبح آغاز گردیده است. تفاوت این دوره از آزمایشات با مرحله قبلی، استفاده از نانو ذرات هیبریدی اکسید آهن و اکسید گرافن با نسبت وزنی ۵۰ درصد در پارافین است. اندازه-گیری‌ها در زمان‌های مختلف این بار نیز در بازه زمانی ۹ تا ۲۱ است. شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج این آزمایشات که به ترتیب مربوط به دمای آب و پوشش شیشه‌ای و میزان نرخ تولید ساعتی آب شیرین کن می‌باشد را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- دمای پوشش شیشه ای و آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ و ۱۴۰۱/۰۵/۰۶

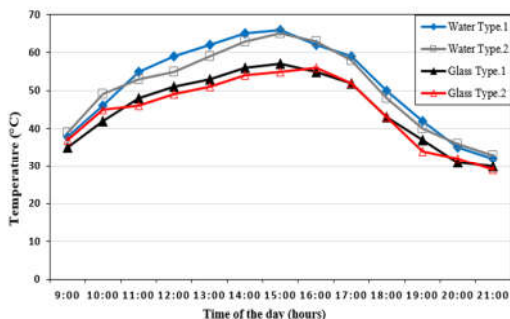


شکل ۶- نرخ تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ و ۱۴۰۱/۰۵/۰۶

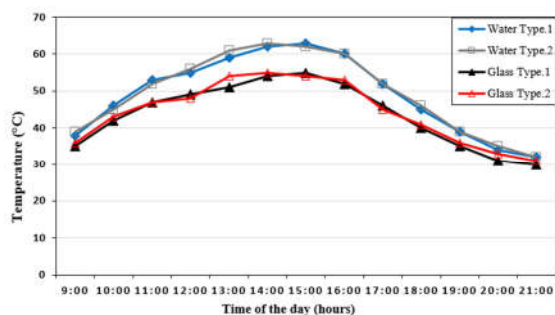
همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده به طور میانگین ۹۰۳ گرم در روز می‌باشد که طبق محاسبات صورت گرفته با استفاده از فرمول ۱ و ۲ که پیش تر ارائه گردید، بازده دستگاه در این حالت ۶/۹۲ درصد می‌باشد. سعی این پژوهش بر آن است تا با استفاده از روش‌های نوین و جدید که در مراحل بعدی آزمایش مطرح خواهد شد، میزان نرخ تولید دستگاه را بهبود ببخشد.

۴-۲- طرح دوم: دستگاه آب شیرین کن خورشیدی همراه با PCM

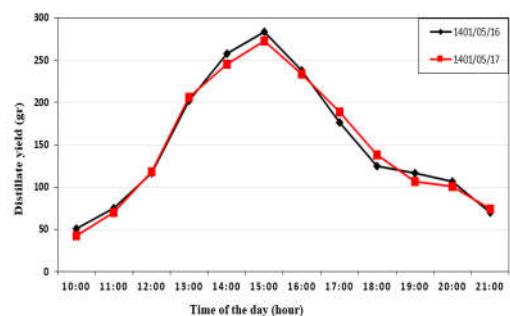
همانند مرحله قبل آزمایشات طی دو روز که هوا آفتابی و صاف بود، از ساعت ۹ صبح آغاز گردید. تفاوت این دوره از آزمایشات با مرحله قبلی، استفاده از پارافین به عنوان PCM و همچنین اندازه‌گیری‌ها در زمان-های مختلف این بار در بازه زمانی ۹ تا ۲۱ است، چرا که با استفاده از پارافین می‌توان هنگام شب نیز به شیرین سازی آب ادامه داد. نتایج این آزمایشات در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است.



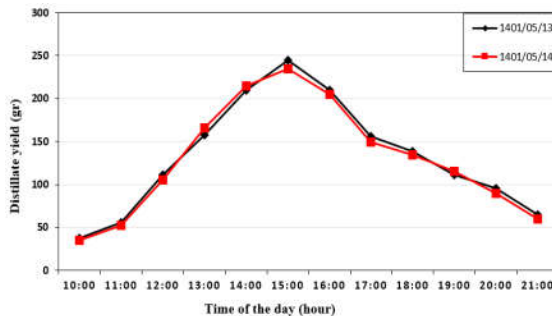
شکل ۱۱- دمای پوشش شیشه ای و آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فاز دهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۷ و ۱۴۰۱/۰۵/۱۶



شکل ۹- دمای پوشش شیشه ای و آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فاز دهنده هیبریدی در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۴ و ۱۴۰۱/۰۵/۱۳



شکل ۱۲- میزان تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فاز دهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۶ و ۱۴۰۱/۰۵/۱۷



نمودار ۱۰- نرخ تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فاز دهنده هیبریدی در مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۴ و ۱۴۰۱/۰۵/۱۳

طی آخرین مرحله آزمایش که اصلی ترین هدف محقق از انجام این پژوهش است، همان طور که در نمودار ۱۲ قابل مشاهده است نرخ تولید دستگاه آب شیرین کن در این حالت به طور متوسط میزان ۱۷۹۵ گرم در طول روز می باشد که این نرخ تولید نسبت به حالت اول ۸۹۲ گرم یعنی ۹۸٪، نسبت به حالت دوم (فقط همراه با PCM) ۵۶۰ گرم یعنی ۴۵٪ و نسبت به حالت سوم (فقط همراه با NPCM) ۲۱۸ گرم یعنی حدود ۱۵٪ بهبود یافته و میزان تولید آب شیرین افزایش یافته است. بازده دستگاه در این حالت ۱۳/۶ درصد می باشد.

علت اصلی تولید آب شیرین در آب شیرین کن های خورشیدی اختلاف دما بین آب داخل حوضچه آب شیرین کن و پوشش شیشه ای می باشد. شکل ۱۳ اختلاف دما بین سطح شیشه و دمای آب حوضچه آب شیرین کن را نشان می دهد که همان گونه که قابل ملاحظه است در هر مرحله از آزمایش به جهت استفاده از PCM، NPCM که به عنوان منبع ذخیره انرژی گرمایی نقش ایفا می کنند، این اختلاف دما بیشتر شده که موجب بهبود عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی می شود و در نهایت در آخرین مرحله از آزمایش این اختلاف دما بدلیل استفاده از NPCM هیبریدی در زیر پله ها و تحت تاثیر قرار دادن آن با میدان مغناطیسی، این اختلاف دما به جهت بالا رفتن رسانایی گرمایی پارافین و مغناطیسی شدن نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی، به بیشترین مقدار در بین این چهار حالت آزمایش رسیده است.

در آزمایش سوم همانطور که گفته شد از نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در زیر هر پله استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که میزان تولید در این حالت به طور میانگین ۱۵۷۷ گرم در روز می باشد که نسبت به حالت اول ۶۷۴ گرم یعنی ۷۵ درصد نرخ تولید روزانه افزایش یافته است. در این مرحله به جهت استفاده از نانوذره هیبریدی که یکی از آنها اکسید گرافن است، میزان انتقال گرما پایین در پارافین که یکی از عیوب آن است، برطرف گردیده و همانطور که مورد انتظار بود بازده دستگاه بهبود یافته و به ۱۲/۳ درصد رسیده است.

۴-۴- طرح چهارم: دستگاه آب شیرین کن خورشیدی همراه با NPCM هیبریدی تحت میدان مغناطیسی

از آنجایی که اکسید آهن (Fe_3O_4) مغناطیسی ترین ماده بر روی کره زمین است، در این مرحله از آزمایش که همانند مراحل قبل، طی دو روز در هوای صاف و آفتابی در بازه زمانی ۹ صبح تا ۹ شب انجام پذیرفته است، از آهنربای صفحه ای با شدت ۶۵ گوس به عنوان میدان مغناطیسی در زیر هر محفظه نگهدارنده نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی استفاده شده است. نتایج این مرحله از آزمایش در شکل ۱۱ که مربوط به دمای آب و پوشش شیشه ای و شکل ۱۲ که مربوط به میزان تولید ساعتی آب شیرین دستگاه می باشد، آمده است.

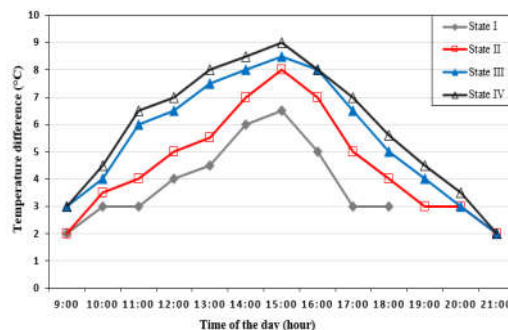
جدول ۵- مقایسه نتایج آب شیرین کن پلکانی مورد مطالعه با

تحقیقات مشابه گذشته			
شماره	نوع آب شیرین کن	درصد بهبود تولید	تحقیق
۱	پلکانی همراه با PCM	۳۷٪	مطالعه حاضر
	پلکانی همراه با NPCM هیبریدی	۷۵٪	مطالعه حاضر
	پلکانی همراه با NPCM هیبریدی تحت میدان مغناطیسی	۹۸٪	مطالعه حاضر
۲	پلکانی همراه با NPCM (paraffin + CuO)	۸۱٪	Ajdari et al. [31]
۳	پلکانی همراه با PCM (stearic acid)	۳۳٪	Kumar et al. [32]
۴	پلکانی همراه با نانوذره MgO	۴۱٪	Jathar et al. [33]
۵	ساده همراه با NPCM (crude wax + ZnO)	۶۵٪	Manoj et al. [34]

۵- نتیجه گیری

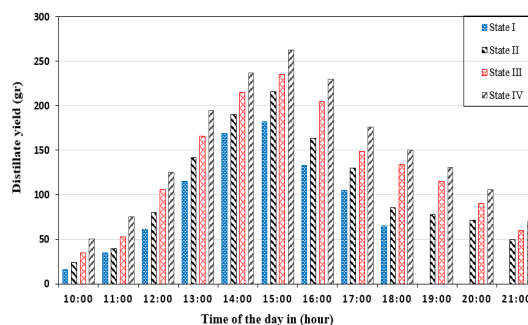
همان گونه که از بخش آزمایشات و نتایج مشهود است استفاده از PCM، NPCM هیبریدی و همچنین بهره‌گیری از میدان مغناطیسی با توجه به میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی پلکانی در ۴ حالت آزمایش، منجر به افزایش نرخ تولید روزانه آب شیرین کن شده و میزان بازدهی این دستگاه را بهبود می‌بخشد. از دلایل این افزایش نرخ تولید می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در مرحله اول استفاده از PCM باعث افزایش دمای آب داخل تشتک شده و از این حیث نرخ تولید را بهبود می‌بخشد. همچنین دستگاه در حالت اولیه (بدون PCM) پس از غروب خورشید، قادر به شیرین سازی آب نخواهد بود اما با استفاده از PCM همان‌گونه که از شکل ۸ پیداست شیرین سازی آب حداقل ۳ ساعت ادامه پیدا کرده و بازده دستگاه را بهبود می‌بخشد.
- به جهت پایین بودن رسانایی گرمایی پارافین (PCM)، در این تحقیق از اکسید گرافن که رسانایی گرمایی بسیار بالایی دارد به عنوان نانوذره به همراه اکسید آهن (Fe_3O_4) یا مگنتیت که مغناطیسی‌ترین ماده بر روی کره زمین است به صورت ترکیبی در پارافین استفاده شده است. استفاده از این نانو ماده تغییر فاز دهنده هیبریدی تا ۷۵ درصد نرخ تولید دستگاه را افزایش داده است.
- در مرحله آخر به بررسی استفاده از میدان مغناطیسی بر روی نانوماده تغییر فاز دهنده پرداخته شده است. از آنجایی که یکی از نانوذرات ترکیبی استفاده شده در این NPCM اکسید آهن (Fe_3O_4) می‌باشد که واکنش بسیار زیادی نسبت به میدان مغناطیسی دارد، استفاده از میدان مغناطیسی به همراه NPCM تا ۹۸ درصد نرخ تولید دستگاه را نسبت به حالت اولیه (حالت ساده) بهبود می‌بخشد.
- با توجه به محاسبات صورت گرفته و نتایج حاصل از آن مشاهده گردید که بازده دستگاه آب شیرین کن خورشیدی از ۶/۹۲ درصد در حالت ساده به ترتیب به ۹/۶، ۱۲/۳ و



شکل ۱۳- اختلاف دما بین سطوح داخلی شیشه با آب تشتک در چهار حالت آزمایش

ارتباط بین میزان نرخ تولید هر مرحله از آزمایش در هر ساعت توسط شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها قابل درک است در هر مرحله از آزمایش میزان نرخ تولید دستگاه نسبت به حالت قبل افزایش یافته است به گونه ای که استفاده از PCM ۳۷ درصد، استفاده از NPCM هیبریدی ۷۵ درصد و با استفاده از میدان مغناطیسی و تحت تاثیر قرار دادن NPCM هیبریدی ۹۸ درصد نسبت به حالت اولیه دستگاه (آب شیرین کن پلکانی ساده) نرخ تولید دستگاه افزایش یافته است.



شکل ۱۴- میزان تولید روزانه برای چهار حالت آزمایش

برای نشان دادن اهمیت استفاده از PCM، NPCM ترکیبی و میدان مغناطیسی، جدول ۵ افزایش نرخ بهره‌وری مطالعه کنونی، نسبت به سایر تحقیقات انجام شده بر روی آب شیرین کن های خورشیدی پلکانی را نشان می‌دهد. از مقایسه مشهود است که استفاده از PCM، NPCM ترکیبی و همچنین میدان مغناطیسی به همراه NPCM ترکیبی، برای بهبود بازده آب شیرین کن خورشیدی پلکانی بسیار چشمگیر است.

- of evaporation and condensation rates in solar stills. *Solar Energy*, Vol. 225, pp. 666-693, 2021.
- [9] Xu C., Xu S. and Eticha R.D., Experimental investigation of thermal performance for pulsating flow in a microchannel heat sink filled with PCM. *Energy Conversion and Management*, Vol. 236, 114071, 2021.
- [10] Shoeb S., Mirjalaly A., Sadi M. and Arabkoohsar A., A comprehensive review of nano-enhanced PCM on solar energy application. *Journal of Energy Storage*, Vol. 50, 104262, 2022.
- [۱۱] گشایشی ح، ادیبی طوسی س، رستمی م. و جعفری ا. تحقیق آزمایشگاهی جهت بهبود بازدهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از پارافین اکسید گرافن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۲، ص. ۲۶۹-۲۷۳، ۱۴۰۰.
- [۱۲] غفوریان، م. نیازمند، ح. اکبری، ز. و زحمت کش، ب. بررسی عملکرد نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحات گرافن در تولید بخار خورشیدی. *نشریه مکانیک سازه ها و سازه ها*، د. ۹، ش. ۲، ص. ۱۸۱-۱۹۶، ۱۳۹۸.
- [۱۳] خسروچردی س، میر عبدالله لوانسانی آ. و دلفانی ش. تحلیل تجربی تاثیر صفحات گرافن اکساید/آب دیونیزه بر عملکرد یک گردآوردنده جذب مستقیم خورشیدی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص. ۱۶۹-۱۷۷، ۱۳۹۷.
- [۱۴] گچکاران آ. و جدا ف. طراحی و بهینه‌سازی آب‌شیرین کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص. ۲۳۵-۲۴۴، ۱۳۹۸.
- [15] Shalaby S.M., El-Bialy E. and El-Sebaei A.A., An experimental investigation of a v-corrugated absorber single-basin solar still using PCM, *Desalination*, Vol. 398, pp. 247-255, 2016.
- [16] Kabeel A.E., Mohamed A.T., Abdelgaied M. and Abdel Aziz G., Modified pyramid solar still with v-corrugated absorber plate and PCM as a thermal storage medium, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 161, pp. 881-887, 2018.
- [17] Yousef M.S., Hassan H., Kodama S. and Sekiguchi H., An experimental study on the performance of single slope solar still integrated with a PCM-based pin-finned heat sink, *Energy Procedia*, Vol. 156, pp. 100-104, 2019.
- [18] Elbahjoui R. and El Qarnia H., Performance evaluation of a solar thermal energy storage system using nanoparticle-enhanced phase change material, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp.2013-2028, 2019.
- [19] Shukla D.L. and Kalpesh V., Hybrid solar still – Liquid desiccant regenerator and water distillation system, *Solar Energy*, Vol. 182, pp. 117-133, 2019.
- [20] Chen W., Zou C., Li X. and Lian H., Application of recoverable carbon nanotube nanofluids in solar desalination system: an experimental investigation. *Desalination*, Vol. 451, pp. 92-101, 2019.
- [21] Sharshir S.W., Eltawil M.A., Algazzar A.M., Sathyamurthy R. and Kandeal A.W., Performance enhancement of stepped double slope solar still by using nanoparticles and linen wicks: energy, exergy and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174, 115278, 2020.
- [22] Shanmugan S., Essa F.A., Gorjian S., Kabeel A.E., Sathyamurthy R. and Muthu Manokar A., Experimental study on single slope single basin solar still using TiO₂ nano layer for natural clean water invention. *Journal of Energy Storage*, Vol. 30, 101522, 2020.
- [23] Kabeel A.E., Sathyamurthy R., Manokar A.M., Sharshir S.W., Essa F.A. and Elshiekh A.H., Experimental study on tubular solar still using Graphene Oxide Nano particles in Phase Change Material (NPCM's) for fresh water production. *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, 101204, 2020.
- [24] Parsa S.M., Rahbar A., Koleini M., Aberoumand S., Afrand M. and Amidpour M.J.D., A renewable energy-driven thermoelectric-utilized solar still with external condenser

۱۳/۶ درصد با استفاده از PCM، NPCM ترکیبی و NPCM ترکیبی تحت میدان مغناطیسی ارتقاء یافته است.

۶- فهرست علائم

A	مساحت (m ²)
h _{fg}	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
I	شدت تابش متوسط (W/m ²)
\dot{m}_p	مجموع نرخ تولید (gr/day)
n	تعداد اندازه گیری
T	دما (K)
x	درصد خطا اندازه گیری
\bar{x}	میانگین حسابی درصد خطا اندازه‌گیری
علائم یونانی	
η_{th}	بازده روزانه
σ	انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها

زیر نویس

m	میانگین
s	سطح
w	آب

۶- مراجع

- [۱] فرساد، س. تحلیل ترمودینامیکی و بهینه سازی آب شیرین کن خورشیدی مورد استفاده در مناطق دوردست کوبری، چهارمین همایش ملی فناوریهای نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران، تهران، ۱۴۰۰، ۱۲۹۲۸۶۵.
- [۲] کهنایان، ا. و رنجبران، ع. آب شیرین کن خورشیدی، اولین کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۹۷، ۸۶۳۰۵۸.
- [۳] ادیبی طوسی، س. و گشایشی، ح. بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با کندانسور خارجی و منبع ذخیره انرژی گرمایی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، ش. ۳، ص. ۱۹۵-۲۰۳، ۱۳۹۹.
- [۴] رستمیان ف.، اعتصامی ن. و حقگو م. کنترل دمای برد الکتریکی با بکارگیری چاه گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده استتاریک اسید. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۴، ص. ۴۳۳-۴۴۱، ۱۴۰۰.
- [۵] احدی، غ.، امیری، ح. و کورکی، ه. بررسی تاثیر مواد تغییر فازدهنده (PCM) بر عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی پله ای بهبود یافته، هفتمین کنفرانس سالانه انرژی پاک، کرمان، ۱۳۶۳۱۳، ۱۴۰۰.
- [۶] رستمیان ف.، اعتصامی ن. و حقگو م. مروری جامع بر استفاده از مواد تغییر فازدهنده در خنک سازی بردهای الکترونیکی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۲، ش. ۱، ص. ۳۵۷-۳۶۵، ۱۴۰۱.
- [۷] گل محمدی، ا.، میرباقری، ی. و معصومی، ح. طراحی و شبیه سازی یک سیستم آب شیرین کن مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده و لوله های گرمایی و کلکتور خورشیدی، چهارمین کنفرانس بین المللی تحقیقات بین رشته ای در مهندسی برق، کامپیوتر، مکانیک و مکترونیک در ایران و جهان اسلام، تهران، ۱۱۸۴۱۷۷، ۱۳۹۹.
- [8] Shoeb S., Rahbar N., Abedini A. and Kargarsharif abdad A., A review of techniques for simultaneous enhancement

- loaded by silver/nanofluid for simultaneously. *Water Disinfection and Desalination*, Vol. 480, 114354, 2020.
- [25] Manoj Kumar P., Anandkumar R., Sudarvizhi D., K. Mysamy K. and Nithish M., Experimental and Theoretical Investigations on Thermal Conductivity of the Paraffin Wax using CuO Nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 22, Part 4, pp. 1987-1993, 2020.
- [26] Abdullah A.S., Essa F.A., Bacha H.B. and Omara Z.M., Improving the trays solar still performance using reflectors and phase change material with nanoparticles. *Journal of Energy Storage*, Vol. 31, 101744, 2020.
- [27] Dhivagar R., Mohanraj M., Raj P. and Krishna R., Thermodynamic analysis of single slope solar still using graphite plates and block magnets at seasonal climatic conditions, *Water Science Technology*, Vol. 84, pp. 2635-2651, 2021.
- [28] Shojaeizadeh E., Veysi F. and Goudarzi K., Heat transfer and thermal efficiency of a lab-fabricated ferrofluid-based single-ended tube solar collector under the effect of magnetic field: An experimental study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 164, 114510, 2020.
- [29] Kabeel A.E., Harby K., Abdelgaied M. and Amr Eisa, Performance of the modified tubular solar still integrated with cylindrical parabolic concentrators, *Solar Energy*, Vol. 204, pp.181-189, 2020.
- [30] Dsilva Winfred Rufuss D., Suganthi L., Iniyana S. and Davies P.A., Effects of nanoparticle-enhanced phase change material on solar still productivity. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 192, pp. 9-29, 2018.
- [31] Ajdari H., Ameri A., Performance assessment of an inclined stepped solar still integrated with PCM and CuO/GO nanocomposite as a nanofluid, *Journal of Building Engineering*, Vol. 49, 104090, 2022.
- [32] Kumar M., Yadav C., Manchanda H., Thermal performance of a weir-type cascade solar still: an experimental study, *International Journal of Advanced Research Innovation*, Vol. 4, pp. 339-344, 2016.
- [33] Jathar L.D., Ganesan S., Assessing the performance of concave type stepped solar still with nanoparticles and condensing cover cooling arrangement: an experimental approach. *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 12, 100539, 2021.
- [34] Manoj Kumar P., Chauhan P., Kumar Sharma A., Lal Rinawa M., Rahul A.J., Srinivas M., Tamilarasan A., Performance study on solar still using nano disbanded phase change material (NDPCM), *Materials Today Proceedings*, Vol. 50, pp. 1894-1897, 2022.