

## مطالعه تجربی و ارزیابی اثر ضخامت ماده متخلخل پشم بر تولید آب شیرین، توزیع دما و بازده انرژی و انرژی پشم بر تولید پله ای خورشیدی

چکیده: در این پژوهش از ماده متخلخل پشم بر روی پله های یک آب شیرین خورشیدی پله ای استفاده شده و اثر ضخامت ماده متخلخل پشم بر روی بازده انرژی و انرژی، میزان تولید آب شیرین و دماهای فضای داخل و پله های آب شیرین کن به صورت تجربی مطالعه می شود. آزمایش ها با ماده متخلخل با ضخامت ۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلیمتر و بدون ماده متخلخل انجام شده اند. نتایج حاصل از این آزمایش ها نشان می دهد که میزان تشعشع بر تولید آب شیرین تاثیر گذار بوده و ماده متخلخل پشم بر روی پله های آب شیرین کن، علاوه بر تاثیر گذاری بر دماهای فضای داخلی آب شیرین کن و پله ها، تولید آب شیرین و بازده بالاتری نسبت به آب شیرین کن بدون ماده متخلخل دارد. به عنوان مثال، تولید آب شیرین و بازده آب شیرین کن با محیط متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر نسبت به آب شیرین کن بدون محیط متخلخل به ترتیب ۰/۳۵ لیتر و ۷/۰۸ درصد بیشتر می باشد.

واژه های راهنما: آب شیرین کن پلکانی، ماده متخلخل پشم، ضخامت، انرژی، انرژی

محمد علیزاده

کارشناسی ارشد

محمد رضا عساری

استاد

میلاذ ستاره\*

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

حسن بصیرت تبریزی

استاد، دانشکده مهندسی  
مکانیک، دانشگاه صنعتی  
امیرکبیر، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

Mohammad  
Alizadeh  
MSc.

Mohammad Reza  
Assari  
Professor

Milad Setareh\*  
Assistant Professor,  
Mechanical Engineering  
Department, Jundi-  
Shapur University of  
Technology, Dezful

Hassan Basirat  
Tabrizi  
Professor, Mechanical  
Engineering Department,  
Amirkabir University of  
Technology, Tehran

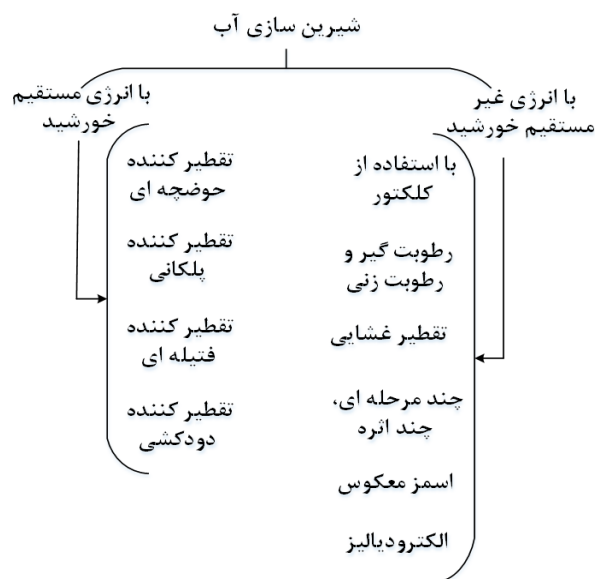
## Experimental study and evaluation of the effect of wool porous material thickness on the distilled water production, temperature distribution and energy and exergy efficiencies of stepped solar still

**Abstract:** In the present study, the wool porous material is used to cover the steps of a stepped solar still and the effect of wool porous material thickness on the energy and exergy efficiencies, distilled water production rate and the temperatures of internal zone and steps are studied experimentally. Experiments are carried out for porous material thicknesses of 4, 6, 8 and 12 mm and without it. Results indicate that solar irradiation affects the amount of distilled water, and the porous material besides affecting the internal temperature of the solar still, causes to produce higher distilled water and higher efficiency than the solar still without the porous material. For example, the amount of distilled water and energy efficiency of solar still with 12 mm-thick of porous material are 0.35 litre and 7.8% higher than the system without porous material.

**Keywords:** Stepped Solar Still, Wool Porous Material, Thickness, Energy, Exergy

## ۱- مقدمه

خورشیدی جهت شیرین‌سازی آب وجود دارد [۲] (شکل ۱): ۱- روش مستقیم که تبخیر آب شور در یک سامانه ثابت خورشیدی در همان مکان فراهم می‌آید و در طی یک مرحله انجام می‌شود و به این روش تقطیر خورشیدی می‌گویند [۳] و ۲- روش غیرمستقیم که آب شیرین کن خورشیدی از دو زیر سیستم کلکتور خورشیدی و واحد نمک زدایی تشکیل شده است. انواع مختلف کلکتورهای خورشیدی مانند صفحه تخت، لوله خلاء، لوله حرارتی و غیره را می‌توان همراه با فرآیندهای نمک زدایی حرارتی مانند رطوبت زن-رطوبت گیر<sup>۱</sup>، تقطیر چند اثره<sup>۲</sup>، تقطیر ناگهانی<sup>۳</sup> و غیره استفاده کرد [۴].



شکل ۱ دسته بندی روش های شیرین سازی آب با انرژی خورشیدی

آب شیرین کن خورشیدی پلکانی یکی از روش های شیرین سازی آب با انرژی مستقیم خورشید است که از چندین پله و یک حوضچه تشکیل شده است. در آب شیرین کن پلکانی، آب شور از مخزنی که در ارتفاعی بالاتر نسبت به دیگر اجزای سامانه قرار دارد، از طریق یک لوله وارد محفظه آب شیرین کن می‌شود. درون محفظه، پلکانی طراحی شده که آب به صورت یک لایه نازک روی آن جریان می‌یابد. صفحه کف هر کدام از پله ها به عنوان یک صفحه جاذب نور خورشید عمل کرده و عملیات تبخیر آب شور در این مرحله انجام می‌شود. بخار آب درون محفظه بالا رفته و بر روی پوشش شفاف عموماً از جنس شیشه تقطیر می‌گردد. با تشکیل قطرات آب خالص روی پوشش شفاف به دلیل مورب بودن شیشه و نیروی جاذبه، قطرات آب به سمت پایین حرکت کرده و از طریق ناودان تعبیه شده جمع آوری می‌شوند

از مجموع کل آب‌های جهان، ۹۷/۴ درصد آن را آب شور دریاها و اقیانوس ها تشکیل می‌دهند. ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب های سطح زمین را تشکیل می‌دهد که بخش بیشتر آن به صورت یخ در قطب های کره زمین و یخچال های طبیعی و آب های زیرزمینی وجود دارد. به این ترتیب، از مجموع آب های کره زمین تنها ۰/۰۱۴ درصد آن قابل استفاده بوده و در واقع، حیات آدمی وابسته به همین مقدار ناچیز آب است. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین تری قرار دارد، در حالی که یک درصد از جمعیت جهان به ایران اختصاص دارد، سهم آن از منابع آب شیرین تنها ۰/۳ درصد است. بررسی ها نشان می‌دهد در حالی که متوسط میزان بارندگی سالانه در جهان ۸۱۳ میلیمتر است، میزان بارندگی در ایران تنها ۲۲۸ میلیمتر بوده که کمتر از یک سوم متوسط بارندگی جهان است [۱]. از این رو ایران با مشکل اساسی تامین آب رو به رو بوده و نیازمند تامین آب شیرین به روش های متنوع است. یکی از راه هایی که برای تولید آب شیرین پیشنهاد می‌شود تبدیل آب شور دریاها به آب شیرین با استفاده از روش های نمک زدایی است. روش های شیرین سازی آب در واحدهای تصفیه سازی به کمک گرم کردن و تبخیر آب صورت گرفته که جهت تامین انرژی از سوخت های فسیلی استفاده می‌گردد. اما باید به دنبال روشی بود که مصرف سوخت کمتر، آلودگی کمتر و هزینه کمتری داشته باشد. بدین منظور استفاده از انرژی تجدید پذیر خورشید در آب شیرین کن های خورشیدی روشی است که پیشنهاد می‌شود. از انرژی تجدید پذیر خورشید می‌توان برای راه اندازی واحدهای نمک زدایی با اثرات زیست محیطی صفر، حداقل تعمیر و نگهداری، هزینه عملیات کم استفاده کرد.

مکانیزم آب شیرین کن خورشیدی در حالت کلی به این صورت است که انرژی خورشید از طریق پوشش شفاف مانند شیشه وارد محفظه آب شده و توسط صفحه جاذب تیره رنگ محفظه، جذب می‌گردد. نور بازتاب شده از صفحه جاذب، به دلیل مات عمل کردن شیشه شفاف، درون محفظه محبوس شده و باعث تجمع انرژی و در نتیجه گرم شدن آب می‌شود. در این حالت انرژی مورد نیاز برای تبخیر آبی که در روش های معمول توسط سوخت فسیلی تامین می‌شود، توسط انرژی خورشید تامین می‌گردد. به طور کلی دو روش برای استفاده از انرژی

<sup>3</sup> Multi stage flashing

<sup>1</sup> Humidification–Dehumidification

<sup>2</sup> Multiple effect distillation

وری روزانه آب شیرین کن پس از اصلاح از ۶/۹ به ۸/۹ کیلوگرم بر متر مربع افزایش یافت. ابوجادر و همکاران [۱۱] عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پلکانی از جنس فلز مس را در مناطق گرمسیری مورد بررسی قرار دادند. آنها با هدف افزایش عملکرد سامانه، از سینی های شیبدار استفاده نمودند. ضریب انتقال حرارت جابجایی، مقدار تبخیر، بهره وری آب و بازده سیستم را برای هر ساعت محاسبه نمودند. براساس نتایج، حداکثر بهره وری ساعتی برای آب شیرین کن، ۶۰۵ میلی لیتر بر متر مربع در ساعت بدست آمد. پانچال و همکاران [۱۲] مطالعات تئوری و تجربی بر روی آب شیرین کن خورشیدی با قطعات مرمر و ماسه سنگ به عنوان مواد ذخیره انرژی گرمایی انجام دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با آب شیرین کن معمولی، مقدار آب شیرین تولید شده با آب شیرین کن خورشیدی با ماسه سنگ و مرمر به ترتیب ۳۰ و ۱۴ درصد افزایش می یابد. شرشیر و همکاران [۱۳] اثر استفاده از نانو ذرات و خنک کاری شیشه کلکتور به منظور افزایش بازده آب شیرین کن را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از نانو ذرات اکسید مس، بهره وری آب شیرین کن با و بدون خنک کاری سطح شیشه کلکتور به ترتیب ۴۴/۹۱ و ۳۷/۰۲ درصد بیشتر از آب شیرین کن بدون استفاده از نانو ذرات در عمق آب شور ۰/۵۵ سانتی متر و با غلظت ۱ درصد است. رشیدی و همکاران [۱۴] تاثیر قرار دادن یک لایه متخلخل مشبک در بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد تولید ساعتی آب شیرین با قرار دادن لایه متخلخل مشبک در حوضچه، بهبود می یابد و حداکثر افزایش بهره وری ساعتی ایجاد شده با استفاده از لایه متخلخل مشبک حدود ۳۳/۷ درصد بیشتر از حالت بدون استفاده از لایه متخلخل در ساعت ۱ بعد از ظهر می باشد. همچنین حداکثر بازده آب شیرین کن با استفاده از لایه متخلخل در ساعت حدود ۱ بعد از ظهر رخ داده و ۳۵/۴ درصد بیشتر از حالت بدون استفاده از لایه متخلخل است. آگراوال و همکاران [۱۵] استفاده از پارچه پنبه ای به عنوان یک ماده متخلخل برای افزایش تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تئوری تجربی مورد بررسی و ارزیابی کردند. سلامی و همکاران [۱۶] تاثیر پوشاندن صفحه جاذب با اسفنج سیاه رنگ بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پوشاندن صفحه جاذب با اسفنج باعث شده که صفحه جاذب حتی در زمانی که تشعشع خورشید کم است، گرم بماند. همچنین از نتایج ارایه شده، دریافت می شود که با استفاده از لایه اسفنج با ضخامت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر بر روی صفحه

و در مخزن آب شیرین تخلیه می گردند. آب شور تبخیر نشده نیز در انتهای مسیر خود از دستگاه خارج و تخلیه می گردد. مزیت آب شیرین کن پلکانی این است که به دلیل فاصله کم میان صفحه جاذب نور خورشید و پوشش شفاف، رطوبت نسبی هوا، بسیار زیاد و نزدیک به ۱۰۰ درصد بوده و هوای محبوس در محفظه، سریعاً اشباع می شود. به همین دلیل نرخ تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، بیشتر از سایر آب شیرین کن های خورشیدی خواهد بود [۵، ۶].

به منظور بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی، روش های متنوعی مانند استفاده از کندانسور، فین، مواد تغییر فازدهنده و غیره پیشنهاد شده است. اخیراً، مواد متخلخل در سامانه های مختلف انرژی خورشیدی که در آن انتقال حرارت به کمک همرفت و تابش به طور همزمان از اهمیت خاصی برخوردارند، استفاده شده است و نتایج حاکی از بهبود عملکرد و بازده سامانه ها می باشد. به طور کلی مواد جامدی که در ساختارشان حاوی حفره و منفذ هستند به عنوان مواد متخلخل مورد تعریف می شوند. یکی از مفاهیم مهمی که در مواد متخلخل مورد بررسی قرار می گیرد، تخلخل می باشد. تخلخل از تقسیم حجم حفره ها به حجم کلی ماده بدست می آید [۷].

آب شیرین کن خورشیدی پلکانی توسط محققین متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیر پارامترهای مختلف بر بهبود عملکرد و بازده آنها ارزیابی شده است. سدیننی و همکاران [۸] یک آب شیرین کن پلکانی شیبدار را طراحی کرده و ساختند. در این پژوهش آزمایشگاهی مشخص گردید که بهره وری آب شیرین کن های پلکانی ۲۰ درصد بیشتر از نوع حوضچه ای آن است. امارا و همکاران [۹] با استفاده از منعکس کننده های داخلی در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، سعی در افزایش بازده و بهره وری آب شیرین کن داشتند. ارتفاع و عرض پله در سامانه آزمایشگاهی مورد بررسی آنها به ترتیب ۵ و ۱۲۰ میلی متر بود. براساس آزمایش های آنها مشخص شد که بهره وری با استفاده از منعکس کننده داخلی از ۵۷ درصد به ۷۵ درصد افزایش می یابد. همچنین بازده روزانه برای آب شیرین کن با و بدون منعکس کننده داخلی به ترتیب برابر ۵۶ و ۵۳ درصد بود. مفتاح و همکاران [۱۰] استفاده از بازتاب دهنده های داخلی و خارجی، فین و کندانسور خارجی و تاثیر آنها بر عملکرد آب شیرین کن پلکانی را به صورت تجربی بررسی کردند. به منظور مقایسه عملکرد آب شیرین کن قبل و بعد از اعمال تغییرات از مدل تعادل انرژی استفاده کردند. با کمک پارامترهایی از جمله اختلاف دما بین آب شور و پوشش شیشه ای، بهره وری و ضریب انتقال حرارت، تأثیر تغییرات اعمال شده را بررسی کردند. بهره

## ۲- سامانه آزمایشگاهی و تشریح آزمون‌های تجربی

سامانه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. سامانه آزمایشگاهی از یک کلکتور پله ای، مخزن آب شور ورودی، مخزن جمع آوری آب شور خروجی و همچنین مخزن جمع آوری آب شیرین تولید شده تشکیل شده است. برای ساختن کلکتور از ورق گالوانیزه به ضخامت  $0/6$  میلی متر استفاده شده است. کلکتور متشکل از ۵ پله به عرض ۱۰ سانتی متر و طول ۱۰۰ سانتی متر و ضخامت  $0/5$  سانتی متر و عرض سینی ۱۲ سانتی متر می باشد (۲ سانتی متر جلو آمدگی هر پله به جز پله آخر که عرض پله برابر عرض سینی، ۱۰ سانتی متر دارد) همچنین سطح کلکتور برابر با  $0/58$  متر مربع می باشد. یکی از پارامترهای مهم برای افزایش بهره وری آب شیرین کن، کاهش اتلافات حرارتی است که این کار با استفاده از عایق مناسب ممکن می شود. برای اینکه اتلاف حرارتی از کف و بدنه آب شیرین کن به محیط بیرون به حداقل مقدار ممکن برسد تمام سامانه آزمایشگاهی به خوبی عایق کاری شده است. عایق استفاده شده از جنس پلی استایرن و همچنین پی وی سی (برای چارچوب بندی) با ضخامت ۴ سانتی متر در بدنه کناری و به ضخامت ۵ سانتی متر در کف کلکتور می باشد. در وسط پله اول (بالترین پله) مجرای ورودی آب شور به کلکتور تعبیه شده است. این مجرا از طریق شیلنگ ست سرم به مخزن نگهداری آب شور که در ارتفاع بالاتری نسبت به پله اول قرار دارد، متصل می شود. ماده متخلخل پشم به رنگ سیاه که بیشترین خاصیت جذب را در بین رنگ ها دارد با ضخامت های مختلف شامل ۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر بر روی پله های آب شیرین کن استفاده می شود به طوریکه تمامی کف ۵ پله پوشانده شود.

برای انجام آزمون های تجربی، مقدار ۲۰ گرم نمک را با ترازو وزن کرده و سپس آنرا در یک لیتر آب مقطر حل کرده و بدین ترتیب آب شور با غلظت  $0/2$  گرم بر لیتر آماده شده و در مخزن آب شور قرار داده می شود. این مخزن توسط ست سرم برای تنظیم کردن میزان دبی آب شور، به آب شیرین کن متصل می گردد. دیتالاگر را در نزدیکی کلکتور قرار داده و حسگرهای مورد نیاز از سوراخ های مشخص شده در بدنه کلکتور، درون محفظه آب شیرین کن قرار داده می شوند و دیتاهای مورد نیاز در فاصله های زمانی مشخص ثبت می گردند. سنسورهای دمایی در نقاط مختلف آب شیرین کن از جمله بر روی ۳ پله کلکتور جهت اندازه گیری دمای آب بر روی پله ها، سطح بیرونی شیشه جهت اندازه گیری دمای بیرونی شیشه، محیط درون آب شیرین کن، نزدیک مجرای آب شور خروجی بر روی پله آخر و در خارج از دستگاه

جاذب، تولید آب شیرین به ترتیب به مقدار ۵۸،  $23/03$  و ۳۰ درصد بیشتر از حالتی است که از اسفنج استفاده نمی شود. ارزیابی انرژی و انرژی یک سیستم آب شیرین کن هیبریدی شامل پنل خورشیدی و آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با پیش گرم کردن آب شور و مواد متخلخل توسط البار و حسن [۱۷] بررسی شد. پیش گرم کردن آب با استفاده از عبور آب از پنل های خورشیدی انجام شد و بدین وسیله، خنک کاری پنل ها نیز انجام گردید. نتایج نشان داد که با پیش گرم کردن ۶۰ درصد آب شور، تولید آب شیرین، بازده انرژی و انرژی به ترتیب  $20/9$ ، ۲۰ و  $60/64$  درصد نسبت به حالت بدون پیش گرم کن افزایش می یابد. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از مواد متخلخل و پیش گرم کن ۶۰ درصد آب شور، بهترین عملکرد برای سامانه آزمایشگاهی بدست می آید و در این حالت، تولید آب شیرین، بازده انرژی و انرژی به ترتیب  $11/8$ ،  $13/5$  و  $32/45$  درصد نسبت به سامانه بدون پیش گرم کن و مواد متخلخل افزایش می یابد.

شرشیر و همکاران [۱۸] اثر استفاده همزمان از نانو ذرات، بازتاب دهنده، خنک کاری شیشه کلکتور و پارچه پشمی متخلخل را بر بهبود عملکرد و ارزیابی اقتصادی و بازده انرژی آب شیرین کن هرمی را به صورت تجربی بررسی کردند. پنج سناریو مختلف با بکارگیری روش های مختلف بهبود عملکرد آب شیرین کن در نظر گرفتند که در همه آنها، استفاده از پارچه پشمی متخلخل به صورت معلق در محفظه آب شیرین کن بکار برده شده بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از همه روش های مذکور شامل نانو ذرات اکسید تیتانیوم، خنک کاری شیشه کلکتور، بازتاب دهنده و پارچه پشمی متخلخل باعث بهبود  $127/27$  درصد در تولید آب شیرین می شود. با توجه به مطالب فوق، هدف اصلی مطالعات و پژوهش های انجام گرفته، بررسی افزایش بازده آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از روش های مختلف است. با مطالعه و بررسی روش های بکار گرفته شده پیشین، پژوهش های قابل توجهی در زمینه بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پله ای انجام نشده و لذا در این پژوهش اثر پوشاندن پله های یک آب شیرین کن خورشیدی پله ای با مواد متخلخل پشم به عنوان روشی نوین بر بهبود تولید آب شیرین و بازده انرژی و انرژی به صورت تجربی مورد بررسی قرار می گیرد. آزمایش های تجربی در شهر شوشتر با موقعیت جغرافیایی  $48/85$  درجه شرقی و  $32/04$  درجه شمالی انجام می شود. با مطالعه موردی تاثیرات ضخامت ماده ماده متخلخل پشم بررسی شده و بهترین عملکرد برای سامانه تعیین می گردد.

نرخ تابش خورشیدی در طول شبانه روز در این منطقه از کشور در هر فصل، تقریباً ثابت بوده، لذا فاصله زمانی بر روی نتایج بدست آمده، تأثیری قابل توجهی ندارد. در زمان انجام آزمون‌ها، جهت قرارگیری آب شیرین کن ثابت و رو به جنوب می باشد. به منظور ارزیابی دقت تجهیزات اندازه‌گیری بر عدم قطعیت پارامترهای مشتق شده مانند بازده انرژی و انرژی، دقت تجهیزات اندازه‌گیری در جدول (۲) نوشته شده است. برای محاسبه مقادیر انحراف و درصد خطا از رابطه‌های (۱) و (۲) که استفاده می‌شود.

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} (x_1 - x_{ave})^2 + (x_2 - x_{ave})^2 + \dots + (x_n - x_{ave})^2} \quad (1)$$

$$x_{ave} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (2)$$

که در اینجا  $U_n$  خطای آزمایش و  $x_1$  تا  $x_n$  پارامترهای اندازه‌گیری شده و  $x_{ave}$  مقدار میانگین پارامتر مورد نظر است. با محاسبه مقدار متوسط آب در طول روز از طریق رابطه (۲) و قرار دادن آن در رابطه (۱)، حداکثر مقدار خطای آب شیرین تولید شده در این پژوهش برابر با ۱۳/۷۷ درصد بدست می‌آید.

جدول ۲ دقت تجهیزات اندازه‌گیری

ردیف	نام دستگاه	دقت
۱ <td>تابش سنج <td><math>\pm 1 \text{ W/m}^2</math> برای مقادیر کمتر از <math>200 \text{ W/m}^2</math></td> </td>	تابش سنج <td><math>\pm 1 \text{ W/m}^2</math> برای مقادیر کمتر از <math>200 \text{ W/m}^2</math></td>	$\pm 1 \text{ W/m}^2$ برای مقادیر کمتر از $200 \text{ W/m}^2$
۲ <td>دیتالاگر دمایی <td><math>\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}</math></td> </td>	دیتالاگر دمایی <td><math>\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}</math></td>	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
۳ <td>ترازو <td><math>\pm 0.1 \text{ g}</math></td> </td>	ترازو <td><math>\pm 0.1 \text{ g}</math></td>	$\pm 0.1 \text{ g}$

#### ۴- بازده انرژی و انرژی

بازده انرژی و انرژی با استفاده از روابط ترمودینامیکی ارایه شده توسط البار و همکاران به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۷]:

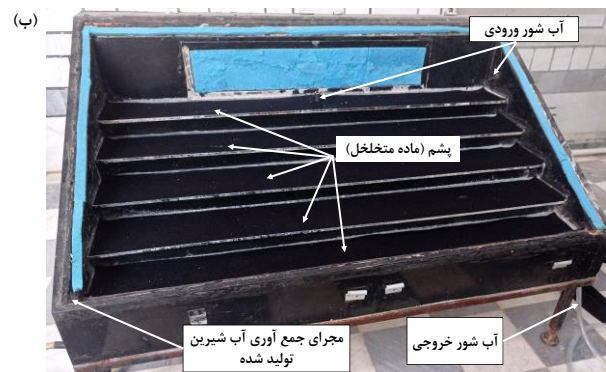
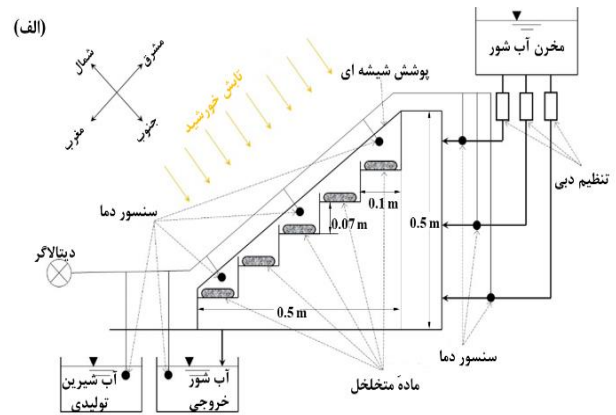
$$\eta_{th} = \frac{\sum \dot{m}_{evp} L_{evp}}{A_p \times \sum R \times 3600} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{x,in} = \dot{E}_{x,sun} = A_p R \left[ 1 - \frac{4}{3} \times \left[ \frac{T_{amb} + 2731.5}{T_{sun}} \right] + \frac{1}{3} \times \left[ \frac{T_{amb} + 273.15}{T_{sun}} \right]^4 \right] \quad (4)$$

$$\dot{E}_{x,out} = \dot{E}_{x,evp} = \frac{\dot{m}_{evp} L_{av}}{3600} \times \left[ 1 - \frac{T_{amb} + 273.15}{T_w + 273.15} \right] \quad (5)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}_{x,out}}{\dot{E}_{x,in}} = \frac{\dot{E}_{x,evp}}{\dot{E}_{x,sun}} \quad (6)$$

در سایه جهت اندازه‌گیری دمای هوای محیط بیرون قرار داده شده اند. همچنین در فاصله‌های زمانی از پیش تعیین شده میزان تشعشع خورشید توسط دستگاه تشعشع سنج ثبت می‌شود.



شکل ۲ سامانه آزمایشگاهی، (الف) نمای شماتیک، (ب) تصویر واقعی

در جدول (۱) حالت‌های مختلف آزمون‌های تجربی نشان داده شده است. آزمون‌ها از ساعت ۸ الی ۱۷ انجام می‌شوند. توسط ست سرم و با دبی مشخص، آب شور از ورودی‌های مشخص وارد آب شیرین کن پلکانی شده و در ساعت‌های مشخص شده، میزان آب شیرین خروجی جمع‌آوری و اندازه‌گیری می‌شود. پس از اتمام زمان آزمون، از داده‌های اندازه‌گیری شده برای تحلیل عملکرد و بازده سامانه آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

جدول ۱ حالت‌های مختلف آزمون‌های تجربی

آزمون	۱	۲	۳	۴	۵
ضخامت نمد (میلی متر)	بدون نمد	۴	۶	۸	۱۲
نماد نشان داده شده در نمودارها	۰	۴	۶	۸	۱۲

#### ۳- تجهیزات اندازه‌گیری و آنالیز عدم قطعیت

درون آب شیرین کن، حرارت جذب شده در پلکان به دلیل عایق بودن پشم، از سطح زیرین پلکان خارج نشده و حرارت را به محیط درون آب شیرین کن اضافه می کند.

شکل (۵) دمای ثبت شده در آزمون های مختلف برای پله بالا را نشان می دهد. در ساعات اولیه آزمایش، دماها تقریباً با هم برابر هستند زیرا ورودی آب شور در سامانه آزمایشگاهی از پلکان بالا است بنابراین آب ورودی، پله بالا و پشم تقریباً هم دما می شوند. همچنین با گذشت زمان، دمای پله بالا در آزمایش بدون مواد متخلخل نسبت به آزمایش های با مواد متخلخل، کمتر می شود زیرا پشم جاذب حرارت است و تشعشع خورشید را به خوبی جذب کرده و سبب افزایش دمای سطح پله می شود. در شکل (۶) دمای ثبت شده در پله وسط و در شکل (۷) دمای پله پایین ترسیم شده اند. با مقایسه شکل های (۴) تا (۷) دریافت می شود که کمترین میزان دمای ثبت شده، مربوط به دمای پله پایین آب شیرین کن می باشد و پس از دمای داخل کلکتور، بیشترین دما متعلق به دمای پله بالا می باشد. این مطلب نشان می دهد که بیشترین تشعشع جذب شده در پله بالای آب شیرین کن می باشد. با مقایسه دماهای اندازه گیری شده در شکل های (۴) تا (۷)، به وضوح مشاهده می شود که در ساعت ۸، تفاوت قابل توجهی در بین تمامی دماها وجود ندارد. دلیل این است که در ساعت ۸، آزمایش ها به تازگی شروع شده و دمای های ثبت شده بسیار نزدیک به دمای محیط بوده است که تقریباً برای تمام روزهای آزمایش مشابه است. همانطور که از شکل ها مشخص است، در فاصله زمانی بین ساعت ۹ الی ۱۷ تفاوت دمایی بین آب شیرین کن با محیط متخلخل و آب شیرین کن بدون محیط متخلخل واضح و قابل مشاهده است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که هر چه ضخامت ماده متخلخل افزایش یابد، دمای فضای داخلی کلکتور و دمای پله ها نیز افزایش می یابند. بعبارت دیگر، دمای آب شیرین کن با محیط متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر از ۸ میلی متر و ۸ میلی متر از ۶ میلی متر و ۶ میلی متر از ۴ میلی متر و ۴ میلی متر از آب شیرین کن بدون نمد بیشتر است. حداکثر مقادیر دمایی ثبت شده، برای آب شیرین کن خورشیدی با محیط متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر بوده است. در واقع ماده متخلخل از جنس پشم پس از چسبیدن بر روی پله های آب شیرین کن، اتلاف حرارتی به محیط را کاهش می دهد. علاوه بر این، وجود ماده متخلخل از جنس پشم به رنگ سیاه، انرژی خورشیدی بیشتری را جذب می کند. کمترین مقادیر ثبت شده دما مابین ساعت ۸ الی ۱۷، مربوط به آب شیرین کن خورشیدی بدون محیط متخلخل است. همانطور که بیان شد، از جمله خواص پشم این است که بسیار رطوبت گیر و جاذب انرژی

که در آن  $\dot{m}_{evp}$  دبی آب شیرین تولید شده برحسب  $L_{evp}$ ،  $kg/h$  گرمای نهان تبخیر برحسب  $A_b$ ،  $J/kg$  مساحت صفحه جاذب بر حسب  $m^2$ ،  $R$  شدت تابش ساعتی برحسب  $W/m^2$  و  $\eta_{th}$  بازده انرژی می باشند. همچنین  $\dot{E}_{x,in}$  نشان دهنده انرژی ورودی و  $\dot{E}_{x,out}$  نشان دهنده انرژی خروجی،  $\eta_{Ex}$  بازده انرژی،  $T_a$  دمای محیط،  $T_w$  دمای آب برحسب درجه سانتیگراد و  $T_{sun}$  دمای خورشید و برابر با ۵۷۰۰ کلوین است.

## ۵- ارائه نتایج

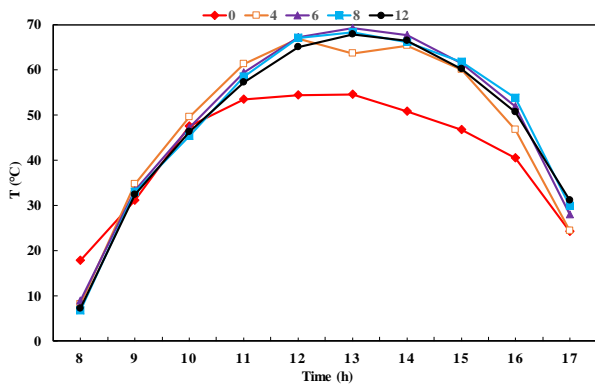
در این بخش بعد از ساخت سامانه آزمایشگاهی و انجام آزمون های تجربی طی چندین روز، پارامترهای موثر بر آب شیرین کن پله ای با مواد متخلخل و تاثیر ضخامت های متفاوت ماده متخلخل بر تولید آب شیرین و بازده مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در این بخش، حاصل حداقل دو بار تکرار آزمایش ها می باشد و میانگین داده های اندازه گیری شده نشان داده می شوند.

شکل (۳) تغییرات ساعتی تشعشع خورشید و دمای محیط در آزمون های مختلف را نشان می دهد. شدت تابش اثر مستقیم بر عملکرد آب شیرین کن دارد. به وضوح مشاهده می شود که تفاوت قابل توجهی بین دماهای ساعتی و میزان تشعشع بین آزمون های مختلف وجود ندارد که به دلیل این است، آزمایش ها در روزهای متوالی انجام شده اند. نمودار فوق نشان می دهد که تا ساعت ۱۳ شدت تابش خورشید روند افزایشی دارد و در این ساعت به مقدار ماکزیمم خود می رسد. بعد از این ساعت کاهش شدت تشعشع خورشید مشاهده می گردد به طوری که در ساعت پایانی آزمایش یعنی ساعت ۱۷، کمترین مقدار تشعشع خورشید ثبت شده است.

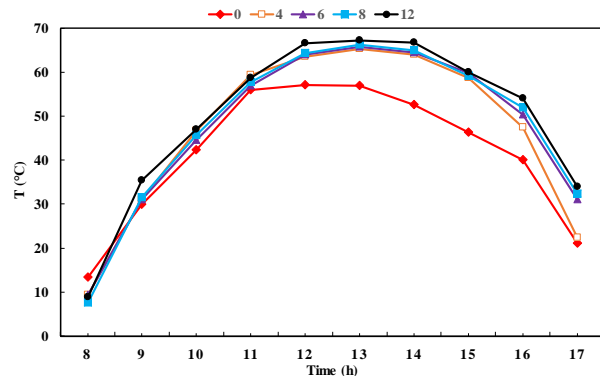
دمای محیط درون کلکتور برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل و بدون آن در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود دمای محیط درون برای حالت های آزمون با استفاده از ماده متخلخل، بسیار به هم نزدیک هستند ولی دمای محیط درون کلکتور برای حالت بدون مواد متخلخل اختلاف قابل توجهی با سایر حالت های آزمون دارد. استفاده از مواد متخلخل بر روی پله های کلکتور باعث شده که انرژی حرارتی خورشید توسط این مواد جذب و انباشته شود و در نتیجه به تدریج و با گذشت زمان سبب گرم نگه داشتن فضای داخل کلکتور شود. همچنین بیشترین مقدار دما بین دماهای اندازه گیری شده، متعلق به آزمایش با ماده متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر است که به دلیل این است، علاوه بر وجود گرما در

و ۰/۸ لیتر است. کمترین مقدار هم مربوط به آب شیرین کن خورشیدی بدون مواد متخلخل با تولید آب شیرین به میزان ۰/۶۳ لیتر می باشد.

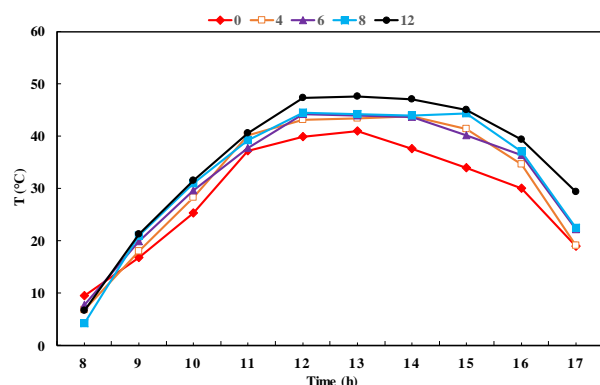
و گرما می باشد و این موضوع استنباط می شود که هر چه میزان ضخامت نمد به رنگ مشکی بیشتر باشد جاذب بهتری برای انرژی خورشیدی و گرما می باشد.



شکل ۵ مقایسه دمای پلکان بالا در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف پشم

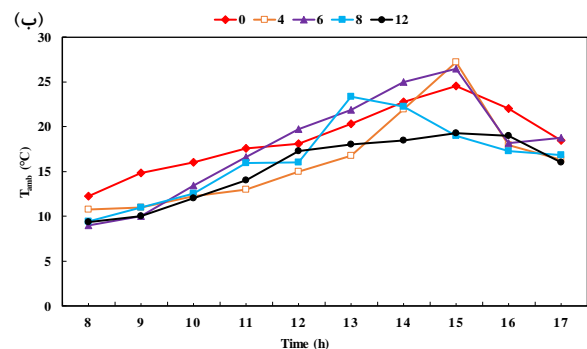
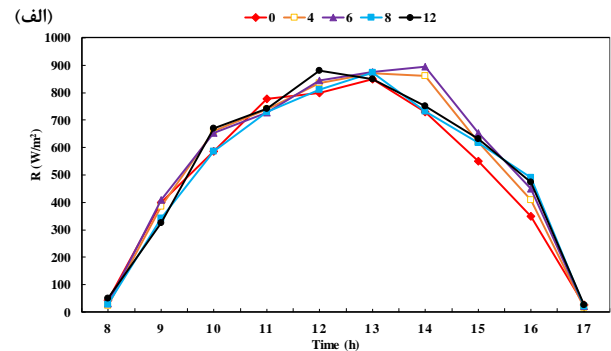


شکل ۶ مقایسه دمای پله وسط در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف پشم

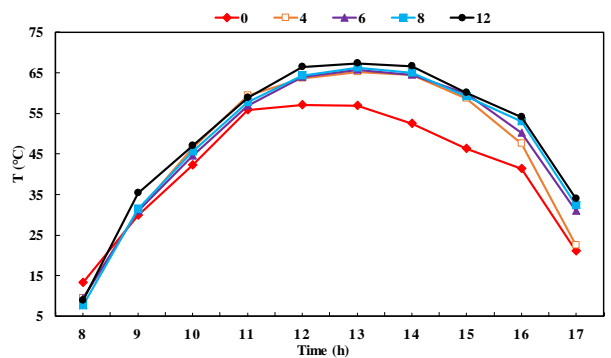


شکل ۷ مقایسه دمای پله پایین در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف نمد

بازده انرژی برای حالت های مختلف آزمایش با حضور مواد متخلخل و همچنین بدون استفاده از مواد متخلخل در جدول (۳) محاسبه و نوشته شده است. نتایج نشان می دهد، بازده آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم به ضخامت ۰،۸، ۶ و ۴ میلی



شکل ۳ (الف) میزان تشعشع خورشیدی و (ب) دمای محیط در ساعت های مختلف آزمون ها



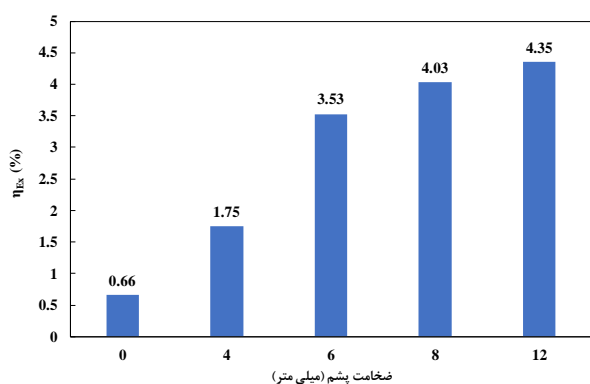
شکل ۴ مقایسه دمای درون در آب شیرین کن با ضخامت های متفاوت پشم

تولید ساعتی آب شیرین برای حالت های مختلف آزمون های تجربی در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که طی ۹ ساعت آزمایش در طول روز، میزان بهره وری آب شیرین به ترتیب از آب شیرین کن بدون مواد متخلخل تا آب شیرین کن با مواد متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر، در حال افزایش بوده است. بیشترین مقدار آب شیرین جمع آوری شده در آب شیرین کن خورشیدی با مواد متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر بود که مقدار آن ۱ لیتر است. در ضخامت های ۸، ۶ و ۴ میلی متر، میزان تولید آب شیرین به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۵



با توجه به اینکه مقدار بازده برای ماده متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر از بقیه حالت ها، بیشتر شده است و به منظور بررسی دقیق تر، مقدار تشعشع ساعتی ( $R$ ) و دماهای محیط ( $T_E$ )، شیشه کلکتور ( $T_G$ )، پله بالا ( $T_{S1}$ )، پله وسط ( $T_{S2}$ )، پله پایین ( $T_{S3}$ )، آب شور ورودی ( $T_{in}$ ) و آب شیرین خروجی ( $T_{out}$ ) بر حسب درجه سانتی گراد در طی زمان آزمون، در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد مقدار تشعشع ساعتی از ساعت ۸ تا ساعت ۱۲ افزایش می یابد و در نتیجه، مقدار دمای محیط، شیشه، پله ها و آب شور ورودی و آب شیرین تولید شده نیز افزایش یافته است. پس از ساعت ۱۲، مقدار تشعشع ساعتی کاهش می یابد ولی ماکزیمم دماها در ساعت ۱۳ رخ می دهد. بدلیل انباشت انرژی حرارتی خورشید توسط ماده متخلخل از زمان شروع آزمایش و همچنین با توجه به اینکه ماکزیمم دمای محیط در ساعت ۱۳ بوده، لذا می توان استدلال کرد که ماکزیمم دمای پله ها، شیشه کلکتور و آب شیرین خروجی نیز در ساعت ۱۳ رخ خواهد داد.

واضح است که بازده انرژی نمی تواند دید جامعی از عملکرد آب شیرین کن ارائه دهد. بنابراین، تحلیل انرژی نیز برای بررسی برگشت ناپذیری برای آزمایش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در شکل (۸) بازده انرژی نشان داده شده است. در روند آزمایش و با توجه به مقادیر به دست آمده مشخص گردید که انرژی ورودی به شدت به مقدار تابش خورشید وابسته است. همچنین انرژی خروجی وابستگی شدیدی به میزان آب حاصل شده در هر ساعت دارد و مقدار آب شیرین تولید شده در هر ساعت به دمای داخلی ککتور، پله ها و صفحه جاذب وابسته است. نتایج نشان می دهد که بیشترین مقدار بازده انرژی برای آزمایش با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر بوده و برابر با ۴/۳۵ درصد بدست می آید.



شکل ۸ بازده انرژی

برای مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش های پیشین، مقدار بازده انرژی و روش بهبود عملکرد در جدول (۵) مقایسه شده اند.

متر از بازده آب شیرین کن بدون ماده متخلخل به ترتیب به مقدار ۰/۰۸، ۶/۵، ۲/۷۶ و ۲/۴۷ درصد بیشتر است. از مقایسه بازده ها این مطلب دریافت می شود که هر چه میزان ضخامت پشم (از ۴ میلی متر تا ۱۲ میلی متر) در آب شیرین کن بیشتر شود، بازده آب شیرین کن نیز بیشتر می شود.

جدول ۳ میزان تولید ساعتی آب شیرین

ضخامت ماده متخلخل (میلی متر)	۱۲	۸	۶	۴	۰
حجم آب شیرین تولید شده (لیتر)	۰/۶۵	۰/۸	۰/۸۵	۰/۹۳	۱
ساعت	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵
۱۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵
۱۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
۱۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
۱۳	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷
۱۴	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱
۱۵	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸
۱۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
۱۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
میانگین (لیتر)	۰/۰۶۵	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۹۳	۱
عدم قطعیت (درصد)	۷/۰۷	۸/۶۷	۹/۱۳	۹/۲۶	۱۱/۰۴
بازده (درصد)	۱۷/۶۳	۲۰/۱	۲۰/۳۹	۲۴/۱۳	۲۴/۷۱

جدول ۴ دماهای محیط، درون، پله ها و آب شور ورودی و آب شیرین خروجی بر حسب درجه سانتیگراد برای ضخامت ۱۲ میلی متر

$T_{out}$	$T_{in}$	$T_m$	$T_{S3}$	$T_{S2}$	$T_{S1}$	$T_G$	$T_E$	$R$	$h$
-	۳/۵۰	۷/۷۵	۴/۱۹	۶/۱۹	۶/۶۳	۷/۶۳	۹/۴۴	۲۸	۸
-	۸/۸۹	۳۱/۴۵	۲۱/۰۰	۲۹/۲۹	۳۳/۰۰	۲۳/۰۰	۱۱/۰۰	۳۴۲	۹
۳۱/۰۰	۱۰/۲۵	۴۵/۶۳	۳۱/۰۰	۴۰/۸۹	۴۵/۳۶	۳۵/۳۵	۱۲/۵۵	۵۸۵	۱۰
۳۷/۱۵	۱۰/۸۱	۵۷/۶۹	۳۹/۲۵	۵۲/۸۸	۵۸/۳۸	۴۰/۰۰	۱۵/۹۴	۷۳۰	۱۱
۴۳/۳۰	۱۴/۶۹	۶۴/۲۵	۴۴/۴۴	۶۰/۶۳	۶۷/۰۰	۴۴/۰۶	۱۷/۰۴	۸۱۰	۱۲
۴۴/۸۵	۲۴/۳۸	۶۶/۲۵	۴۴/۹۰	۶۲/۸۱	۶۸/۲۵	۴۶/۷۵	۲۳/۳۸	۷۸۲	۱۳
۴۳/۵۶	۲۶/۷۵	۶۵/۰۰	۴۳/۵۶	۶۱/۲۵	۶۶/۰۶	۴۴/۳۱	۲۲/۲۲	۷۳۳	۱۴
۴۰/۱۰	۲۶/۶۳	۵۹/۱۳	۴۰/۴۴	۵۶/۵۶	۶۱/۷۵	۴۲/۰۶	۱۹/۰۰	۶۱۸	۱۵
۳۷/۰۰	۲۵/۹۴	۵۳/۰۶	۳۷/۰۶	۵۰/۶۹	۵۳/۸۱	۳۸/۳۸	۱۷/۲۵	۴۹۰	۱۶
۲۲/۱۲	-	۳۲/۳۱	۲۲/۴۴	۲۹/۵۰	۲۹/۸۸	۱۹/۸۱	۱۶/۸۵	۲۱	۱۷



ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر بدست آمد که برابر با ۴/۳۵ درصد می باشد. پس از نتایج بدست آمده، دریافت می شود که استفاده از پشم سیاه رنگ با ضخامت ۱۲ میلی متر، بهره وری ۱ لیتر و بازده ۲۴/۷۱ درصد، ایده آل ترین حالت در بین ضخامت های متفاوت ماده متخلخل برای افزایش بهره وری و بازده در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی می باشد.

## ۷- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

$A_b$	مساحت صفحه جاذب ( $m^2$ )
$\dot{E}_x$	نرخ انرژی ( $W$ )
$h$	زمان ( $h$ )
$L$	انتالپی تبخیر آب ( $J/kg$ )
$\dot{m}$	دبی آب شیرین تولید شده ( $kg/h$ )
$R$	تشعشع خورشید ( $W/m^2$ )
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )

### علائم یونانی

$\eta$  بازده

### زیرنویس ها

$amb$	محیط
$evp$	تبخیر
$in$	ورودی
$out$	خروجی
$sun$	خورشید
$w$	آب

## ۷- مراجع

- [1] H. Bagheri Esfeh, R. Rostam Zadeh, and M. Rostam Zadeh, "Review on different solar still systems," (in Persian), *Scientific journal of the Iranian Mechanical Engineering Association*, vol. 28, no. 1, pp. 24-34, 2019, doi: <https://doi.org/10.16059719.1398.28.1.3.9>.
- [2] G. Peng and S. W. Sharshir, "Progress and performance of multi-stage solar still – A review," *Desalination*, vol. 565, p. 116829, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116829>.
- [3] P. K. Chaurasiya et al., "A review of techniques for increasing the productivity of passive solar stills," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102033, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102033>.
- [4] P. Negi, R. Dobriyal, D. B. Singh, and G. K. Badhotiya, "A review on passive and active solar still using phase change materials," *Materials Today*:

جدول ۵ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش های پیشین

پژوهشگر	روش بهبود	بازده (درصد)
سلامی و همکاران [۱۶]	استفاده از لایه های اسفنج سیاه شده در آب شیرین کن	۲۳/۰۳
عبدالله و همکاران [۱۹]	استفاده از مواد متخلخل	۲۸
رشیدی و همکاران [۱۴]	استفاده از مواد متخلخل مشبک	۱۷/۳۵
پژوهش حاضر	استفاده از پشم به عنوان ماده متخلخل (ضخامت ۱۲ میلی متر)	۲۴/۷۱

## ۶- نتیجه گیری

مشکل اساسی آب شیرین کن هایی خورشیدی، بازده پایین آن ها می باشد به همین جهت در این پژوهش برای افزایش بهره وری و بازده آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، از ماده متخلخل پشم برای پوشاندن پله ها استفاده شد و تاثیر ضخامت ماده متخلخل (۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر) بر بهبود بهره وری آب شیرین کن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. آزمون های تجربی از ساعت ۸ الی ۱۷ انجام شدند و با اندازه گیری تشعشع خورشید، دمای محیط، دمای فضای داخل کلکتور، دمای پله ها و مقدار آب شیرین تولید شده، عملکرد آب شیرین کن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از پشم سیاه رنگ در آب شیرین کن، دما فضای داخل آب شیرین کن با ماده متخلخل از آب شیرین کن بدون ماده متخلخل بیشتر است. همچنین با تحلیل نتایج دریافت شد که هر چه میزان ضخامت ماده متخلخل پشم بیشتر باشد، دماهای فضای داخلی، پله بالا، پله وسط و پله پایین در یک ساعت مشخص، نیز بیشتر می شود. مقایسه نتایج نشان داد که هر چه ضخامت ماده متخلخل پشم بیشتر باشد، مقدار تولید آب شیرین نیز بیشتر می شود. به عنوان مثال تولید آب شیرین در آب شیرین کن با پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از آب شیرین کن بدون پشم به میزان ۳۵۰ میلی لیتر بیشتر بوده است. از محاسبه بازده و مقایسه آن ها نیز نتیجه شد که بازده آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از ۸ میلی متر و ۸ میلی متر از ۶ میلی متر و ۶ میلی متر از ۴ میلی متر بیشتر است به طوریکه اختلاف بازده بین آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از آب شیرین کن بدون پشم ۷/۰۸ درصد می باشد. همچنین به منظور بررسی جامع تر، بازده انرژی در حالت های مختلف آزمایش محاسبه شد و مقدار ماکزیمم بازده انرژی برای حالت آب شیرین کن با

- Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 221-229, 2018/04/03 2018, doi: 10.1080/01430750.2017.1298059.
- [13] S. W. Sharshir *et al.*, "Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 684-693, 2017/02/25/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.085>.
- [14] S. Rashidi, N. Rahbar, M. S. Valipour, and J. A. Esfahani, "Enhancement of solar still by reticular porous media: Experimental investigation with exergy and economic analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 1341-1348, 2018/02/05/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.089>.
- [15] A. Agrawal and R. S. Rana, "Theoretical and experimental performance evaluation of single-slope single-basin solar still with multiple V-shaped floating wicks," *Heliyon*, vol. 5, no. 4, p. e01525, 2019/04/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01525>.
- [16] M. H. Sellami, T. Belkis, M. L. Aliouar, S. D. Meddour, H. Bouguettaia, and K. Loudiyi, "Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 5, pp. 111-117, 2017/09/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.004>.
- [17] A. R. Abd Elbar and H. Hassan, "Energy, exergy and environmental assessment of solar still with solar panel enhanced by porous material and saline water preheating," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 124175, 2020/12/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124175>.
- [18] S. W. Sharshir, M. A. Rozza, M. Elsharkawy, M. M. Youns, F. Abou-Taleb, and A. E. Kabeel, "Performance evaluation of a modified pyramid solar still employing wick, reflectors, glass cooling and TiO<sub>2</sub> nanomaterial," *Desalination*, vol. 539, p. 115939, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115939>.
- [19] S. Abdallah, M. M. Abu-Khader, and O. Badran, "Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills," *Desalination*, vol. 242, no. 1, pp. 128-137, 2009/06/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.036>.
- Proceedings*, vol. 46, pp. 10433-10438, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.996>.
- [5] S. S. Adibi Toosi, H. R. Goshayeshi, and S. Zeinali Heris, "Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser," *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102681, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102681>.
- [6] H. Amiri, "Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser," *Solar Energy*, vol. 248, pp. 88-102, 2022/12/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.006>.
- [7] B. Darbari and S. Rashidi, "Performance analysis for single slope solar still enhanced with multi-shaped floating porous absorber," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101854, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101854>.
- [8] S. B. Sadineni, R. Hurt, C. K. Halford, and R. F. Boehm, "Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still," *Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 71-80, 2008/01/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.08.003>.
- [9] Z. M. Omara, A. E. Kabeel, and M. M. Younes, "Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 876-881, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.092>.
- [10] A. F. Muftah, K. Sopian, and M. A. Alghoul, "Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts," *Desalination*, vol. 435, pp. 198-209, 2018/06/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>.
- [11] M. S. S. Abujazar, S. Fatihah, E. R. Lotfy, A. E. Kabeel, and S. Sharil, "Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate," *Desalination*, vol. 425, pp. 94-103, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.022>.
- [12] H. Panchal, D. K. Patel, and P. Patel, "Theoretical and experimental performance analysis of sandstones and marble pieces as thermal energy storage materials inside solar stills," *International Journal of Ambient*