

**Research Paper**

**مقاله پژوهشی**

**Investigation of the Effect of Changes in Parameters of the Double Pass Solar Air Collector on the Water Production Rate in the Solar Still Coupled with the Air Heater**

**بررسی میزان تولید آب در آب شیرین کن خورشیدی ترکیب شده با هواگرم کن با تغییر پارامترهای مربوط به هواگرم کن خورشیدی دو مسیره**

Parisa Azari<sup>1\*</sup>, Arash Mirabdollah Lavasani<sup>2</sup>, Nader Rahbar<sup>3</sup> and Kamyar Mohammadi<sup>4</sup>

پریسا آذری<sup>۱\*</sup>، آرش میرعبداله لواسانی<sup>۲</sup>، نادر رهبر<sup>۳</sup> و کامیار محمدی<sup>۴</sup>

1- PhD in Mechanical Engineering, Water and Wastewater Company of Zanjan, Zanjan, Iran.

۱- دکترای مهندسی مکانیک، شرکت آب و فاضلاب استان زنجان، زنجان، ایران.

2- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران.

3- Energy and Sustainable Development Research Center, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran.

۳- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، سمنان، ایران.

4- MSc in Mechanical Engineering, Water and Wastewater Company of Zanjan, Zanjan, Iran.

۴- کارشناسی ارشد مکانیک، شرکت آب و فاضلاب استان زنجان، زنجان، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [parisaazari@gmail.com](mailto:parisaazari@gmail.com)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [parisaazari@gmail.com](mailto:parisaazari@gmail.com)

Received: 18/01/2025

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

Revised: 18/03/2025

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

Accepted: 13/05/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

**چکیده**

In this work, a solar still is thermally coupled with a double pass solar air heater with a V-grooved absorber plate to enhance the overall thermal efficiency and freshwater productivity. A mathematical model is developed to evaluate the influence of key air-heater design and operating parameters on the performance of the active solar desalination system. The conventional configuration of the solar still is modified by incorporating a dedicated duct beneath the basin to facilitate the passage of heated air. The hot air discharged from the solar air heater flows through this duct and increases the temperature of the basin water, thereby intensifying the evaporation process. The effects of absorber plate tilt angle, V-groove height, absorber-glass spacing, air-heater length, and air mass flow rate on the freshwater yield are systematically investigated. The results reveal that reducing the inlet air mass flow rate from 0.059 to 0.015 kg/m<sup>2</sup>·s leads to a 61% enhancement in freshwater production, mainly due to the increased heat transfer from the heated air to the basin water. In contrast, variations in the other examined parameters exhibit no appreciable impact on the productivity of the solar still.

در این مقاله برای افزایش میزان بازدهی و تولید آب در آب شیرین کن‌ها، یک آب شیرین کن خورشیدی تقطیری با یک هواگرم کن خورشیدی دومسیره با صفحه جاذب دنداندار کوپل شده است. اثر تغییر پارامترهای مختلف هواگرم کن بر میزان تولید آب در آب شیرین کن خورشیدی فعال، با استفاده از مدل سازی ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار آب شیرین کن به گونه‌ای تغییر داده شده که محفظه‌ای برای عبور هوای گرم در زیر تشتک آب شیرین کن در نظر گرفته شود و از هوای گرم خروجی از هواگرم کن برای افزایش دمای آب درون تشتک آب شیرین کن استفاده شود. در این مطالعه اثر زاویه صفحه جاذب، ارتفاع دندانهای V شکل جاذب، فاصله بین جاذب و شیشه در هواگرم کن، طول هواگرم کن و دبی جرمی هوا در میزان تولید آب در آب شیرین کن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش نرخ دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم کن از ۰/۰۵۹ تا ۰/۰۱۵ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه، نرخ تولید آب به دلیل انتقال گرمای بیش تر از هوای گرم شده در هواگرم کن به آب درون تشتک آب شیرین کن، ۶۱٪ افزایش می‌یابد. همچنین افزایش یا کاهش سایر پارامترهای ذکر شده، اثر محسوسی را بر روی میزان تولید آب در آب شیرین کن نخواهد داشت.

**Keywords:** Solar Still, Double Pass Solar Air Collector, Water Production, Air Mass Flow Rate.

**کلمات کلیدی:** آب شیرین کن خورشیدی، هواگرم کن دومسیره، تولید آب، دبی جرمی، هوا.

آذری و همکاران (۱۴۰۱) در یک کار تحقیقاتی، طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن خورشیدی ترکیب‌شده با هواگرم‌کن خورشیدی دومسیره با صفحه جاذب دندانه‌دار را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان تولید آب ۱۷۰ درصد نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی بالاتر است.

صمیمی و مقدم (۱۴۰۳)، آب‌شیرین‌کن شیب‌دار از نوع پله‌ای را از نظر اثر پارامترهای ساختاری مانند ارتفاع پله‌ها، فاصله بین پله‌ها و فاصله بین صفحه جاذب و سطح کندانسور بر روی میزان تولید آب بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پارامترهای یادشده اثر زیادی را بر میزان تولید آب دارند.

Tei et al. (2024) یک آب‌شیرین‌کن جدید که در آن از ماسه به‌عنوان مواد ذخیره انرژی حرارتی محسوس استفاده شده بود، بررسی کرد. وجود ماسه درون تشتک، سبب افزایش دما شد و تولید آب را در طول شب زیاد کرد. نتایج نشان داد که بازده انرژی و انرژی با وجود ماسه افزایش داشته است.

Abdelgaied et al. (2023) با هدف افزایش میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن‌های مخروطی، طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن مخروطی با پوشش شفاف با زوایای مختلف نسبت به افق را بررسی کردند. زوایای پیشنهادی آن‌ها برای آب‌شیرین‌کن مخروطی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بود. نتایج نشان داد که میزان تولید آب در زاویه ۳۰ درجه به ترتیب ۱۶/۸۳ درصد و ۵۵/۲۶ درصد نسبت به حالت با زاویه ۴۵ درجه و ۶۰ درجه افزایش داشته است.

یک مطالعه تجربی توسط Sai and Reddy (2024) برای مشاهده اثر بازتابنده‌های ثانویه تخت بر روی آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار با پارتیشن انجام شد. آب‌شیرین‌کن ساخته‌شده در این مطالعه دارای ۱۰ پارتیشن با ظرفیت کل ۳۵ کیلوگرم آب ورودی و مساحت ۱/۳۲ مترمربع بود. محققان بازده حرارتی را در زوایای بازتاب مختلف بررسی کردند. با اضافه کردن بازتابنده ثانویه به آب‌شیرین‌کن، میزان تولید آب ۱۰/۱۷ درصد افزایش یافت.

افشاری (۱۴۰۴) در یک کار تحقیقاتی یک گرم‌کن خورشیدی و کندانسور را با یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی کوپل کرده و بازدهی آن را با آب‌شیرین‌کن معمولی مقایسه کرد. یافته‌های او نشان داد که میزان تولید آب در این سیستم ۱۴۴/۷ درصد بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن‌های معمولی است. Zakaria et al. (2025) نیز تازه‌ترین اقدامات پژوهشی انجام‌شده در زمینه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی را مرور کردند.

Chang et al. (2025) یک آب‌شیرین‌کن مخروطی را که مجهز به یک متمرکزکننده خورشیدی بود و با آب‌خنک‌کاری می‌شد، مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین

کاهش نزولات جوی و خشکسالی‌های اخیر، مسئولان را بر آن داشته تا اقداماتی را در راستای مدیریت مصرف و استفاده از شیوه‌های نوین برای تولید و انتقال و توزیع آب به انجام برسانند. همچنین استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان یک راه‌حل بدیع برای تأمین انرژی به‌منظور تولید آب با ماهیت سازگار و پایدار و حفظ محیط‌زیست است. در این میان، محققان نیز با ارائه ایده‌ها و طرح‌های مختلف در این مسیر گام‌های مهمی برداشته و اقدامات ارزنده‌ای انجام داده‌اند. از طرفی با توجه به کمبود منابع آبی در کره زمین و به‌منظور تأمین آب مناسب و بهداشتی، استخراج آب از منابع آب‌های شور از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. منابع آب نامتعارف، جایگزین‌هایی هستند که برای منابع آب شیرین موجود در کره زمین، معرفی شده‌اند. یکی از مهم‌ترین منابع آب نامتعارف، آب‌های شور و لب‌شور به‌شمار می‌آیند (صراف‌زاده، ۱۳۹۶). لذا استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تقطیری، با توجه به پاک بودن و در دسترس بودن انرژی خورشیدی باید در اولویت قرار گیرد (هاشم‌پور و همکاران، ۱۴۰۳). محققان اقدامات مختلفی را برای بردن بازده تولید آب در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تقطیری انجام داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Abdullah (2013) در یک کار تحقیقاتی، عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی و آب‌شیرین‌کن خورشیدی پله‌ای را مقایسه کرد. در طرح او از هوای گرم برای افزایش دمای آب درون تشتک آب‌شیرین‌کن و بر روی سطح شیشه نیز از آب برای خنک‌کاری شیشه استفاده شده بود. هواگرم‌کن استفاده‌شده از نوع لوله‌ای با طول ۲ متر بود. نتایج نشان داد که میزان تولید آب ۱۱۲ درصد نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی افزایش داشته است.

Eltawil and Omara (2014) برای افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی تبخیری از سلول‌های فتوولتاییک و هوای گرم استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که عملکرد سیستم در حالت استفاده از کندانسور و کلکتور هوا ۶۰ درصد بهبود می‌یابد. Poblete et al. (2016) اثر چندین عامل تأثیرگذار در عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی کوپل‌شده با کلکتور خورشیدی از جمله گرمایش تشتک آب‌شیرین‌کن، جنس پوشش، تأثیر استفاده از آینه و استفاده از سیستم خارج‌کننده هوا را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که وجود خروجی هوا برای خارج کردن هوای درون آب‌شیرین‌کن سبب تضعیف عملکرد آب‌شیرین‌کن خواهد شد.

از جمله طول هواگرم کن، دبی هوای ورودی به هواگرم کن، زاویه صفحه جاذب، فاصله بین جاذب و شیشه و ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب هواگرم کن بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از مدل‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۱ مقایسه اقدامات انجام شده در زمینه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ارائه شده است.

داده‌های تجربی و مدل‌سازی وجود دارد. نرخ تولید آب  $37/63 \frac{g}{15 min}$  و اختلاف بین نتایج تجربی و محاسبات تئوری  $19/6$  درصد بود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که اقدامات محققین برای بررسی تأثیر هواگرم کن خورشیدی بر بازده آب‌شیرین‌کن خورشیدی بسیار اندک بوده است؛ لذا در این مقاله اثر تغییر برخی از پارامترهای مهم هواگرم‌کن‌های خورشیدی

جدول ۱- مقایسه اقدامات انجام شده در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی

نام محققان - سال	موضوع تحقیق	درصد افزایش تولید آب
Abdullah (2013)	بررسی اثر استفاده از هواگرم‌کن خورشیدی با طول ۲۰ متر بر میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن	۱۱۲
Eltawil and Omara (2014)	استفاده از سلول‌های فتوولتائیک و هوای گرم برای افزایش بازده آب‌شیرین‌کن خورشیدی	۶۰
Abdelgaied et al. (2023)	بررسی اثر زوایای مختلف در آب‌شیرین‌کن خورشیدی مخروطی بر بازده تولید آب	۵۵/۲۶
Sai and Reddy (2024)	مشاهده اثر بازتابنده‌های ثانویه تخت بر روی آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار با پارتیشن	۱۰/۱۷
Afshari (2025)	بررسی تولید آب در آب‌شیرین‌کن خورشیدی کوپل شده با گرمکن خورشیدی و کندانسور	۱۴۴/۷
Azari et al. (2021)	بررسی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن خورشیدی ترکیب شده با هواگرم‌کن خورشیدی	۱۷۰

خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس انتخاب شده برای ساخت بدنه آب‌شیرین‌کن از گالوانیزه با ضخامت  $0/0006$  متر و ضخامت شیشه هر دو سیستم  $0/002$  متر بود. مساحت تشتک آب‌شیرین‌کن  $0/4$  مترمربع و سطح هواگرم‌کن  $0/5$  مترمربع بود. کف تشتک آب‌شیرین‌کن و هم‌چنین صفحه جاذب در هواگرم‌کن برای جذب تشعشع بیش‌تر با رنگ سیاه رنگ‌آمیزی شد. ارتفاع دندانه‌های V شکل جاذب هواگرم‌کن  $1/5$  سانتی‌متر و زاویه مربوط به هر دندانه  $120$  درجه بود. برای انتقال هوای گرم از هواگرم‌کن به آب‌شیرین‌کن، یک محفظه در بخش زیرین آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته شد که با استفاده از لوله‌هایی که به‌خوبی عایق شده، هوای گرم را از هواگرم‌کن به محفظه عبور هوا در زیر آب‌شیرین‌کن انتقال می‌داد. برای جمع‌آوری آب تقطیر شده در انتهای بخش شیب‌دار آب‌شیرین‌کن، یک سینی کوچک در نظر گرفته شد که آب تولید شده را به سمت بطری مخصوص جمع‌آوری آب تازه هدایت می‌کرد.

## ۲- بیان مسئله

طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و آب‌شیرین‌کن خورشیدی ترکیب شده با هواگرم‌کن خورشیدی، از اقدامات صورت گرفته در این تحقیق است. هم‌چنین مدل‌سازی ریاضی هر دو آب‌شیرین‌کن نیز انجام شده و اثر پارامترهای مختلف بر روی میزان تولید آب مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله پارامترهایی که باید اثر آن‌ها را بر میزان کارایی و نحوه عملکرد آب‌شیرین‌کن ترکیب شده با هواگرم‌کن خورشیدی مورد بررسی قرار داد، می‌توان به مشخصات هواگرم‌کن مانند ارتفاع دندانه‌های جاذب، فاصله بین جاذب و شیشه، دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن، زاویه صفحه جاذب و طول کلکتور اشاره نمود که بر روی دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن تأثیر گذاشته و بالطبع سبب ایجاد تغییر در عملکرد آب‌شیرین‌کن خواهد شد؛ لذا در این مقاله به‌طور دقیق‌تری تأثیر پارامترهای مربوط به هواگرم‌کن بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی شده است. شایان ذکر است پیش‌بینی می‌شود که پارامترهای دیگری از جمله شرایط محیطی مانند رطوبت نسبی و سرعت وزش باد و ... و برخی پارامترهای فیزیکی دیگر مانند جنس و نوع صفحه جاذب هواگرم‌کن نیز بر عملکرد سیستم تأثیرگذار باشند که در این پژوهش به دلیل محدودیت و جلوگیری از طولانی شدن مطلب از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شده است.



شکل ۱- سیستم آزمایشگاهی شامل آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و آب‌شیرین‌کن ترکیب شده با هواگرم‌کن خورشیدی (آذری و همکاران، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱)

## ۳- شرح دستگاه

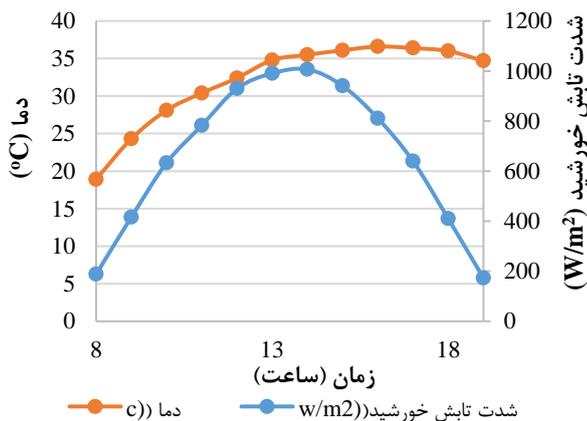
تصویر آب‌شیرین‌کن خورشیدی ترکیب شده با هواگرم‌کن

#### ۴- معادلات حاکم

که  $\dot{m}$ : تولید آب برحسب  $kg, T_w$ : دمای آب در آب شیرین کن برحسب  $(^{\circ}C), T_g$ : دمای شیشه در آب شیرین کن  $(^{\circ}C), h_{fg}$ : گرمای نهان تبخیر آب و  $h_{evp}$ : ضریب انتقال حرارت تبخیر برحسب  $\frac{J}{kg}$  هستند.

#### ۵- نتایج حاصل از آزمایش ها و مدل سازی

آزمایش های مربوط به بررسی میزان تولید آب و بازدهی آب شیرین کن خورشیدی ترکیب شده با هواگرم کن در ۸ روز بین روزهای ۲۰ تا ۳۱ مردادماه ۱۳۹۹ انجام شد. برای بررسی عملکرد آب شیرین کن با استفاده از مدل سازی ریاضی، از داده های آب و هوایی در ۳۱ مردادماه استفاده شد. نمودار تشعشع خورشید و دمای هوای محیط برای روز ۱۳۹۹/۰۵/۳۱ در شکل ۲ ارائه شده است. مشاهده می شود که شدت تابش خورشید از ۱۷۳ تا ۱۰۰۷ وات بر مترمربع تغییر کرده و در ساعت ۱۴ به حداکثر مقدار خود می رسد. هم چنین دمای هوای محیط از  $18/9^{\circ}C$  تا  $36/6^{\circ}C$  در طول آزمایش تغییر می کند.



شکل ۲- نمودار تغییرات تشعشع خورشید و دمای هوای محیط برای روز ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

#### ۵-۱- اثر تغییرات پارامترهای مربوط به هواگرم کن خورشیدی بر میزان تولید آب در آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن

تغییرات برخی پارامترهای مهم هواگرم کن خورشیدی ممکن است بر روی بازده و کارایی آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن خورشیدی تأثیرگذار باشد؛ لذا در این تحقیق از روش مدل سازی ریاضی سیستم آب شیرین کن برای بررسی این موضوع استفاده شده است. در میان پارامترهای مختلفی که بر روی دمای هوای خروجی از هواگرم کن اثرگذارند، ارتفاع دندانهای V شکل جاذب  $(H_{g,ac})$ ، فاصله بین جاذب و شیشه  $(H_{c,ac})$ ، دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم کن  $(\dot{m}_{ac})$ ، زاویه صفحه جاذب  $(\theta)$  و طول

در این تحقیق فرض شده که هوای مرطوب گاز ایده آل و اشباع بوده و دستگاه بدون نشتی بخار است. هم چنین به دلیل وجود شرایط اشباع در محفظه آب شیرین کن، فرض می شود که میزان تبخیر و تقطیر برابر بوده و از انتقال جرم صرف نظر شده است. رابطه موازنه انرژی برای شیشه، آب و صفحه زیرین آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن خورشیدی براساس ضرایب انتقال حرارت به صورت زیر است (آذری و همکاران، ۱۴۰۱):

$$\alpha_g I + h_1(T_w - T_g) = h_2(T_g - T_a) \quad (1)$$

که  $\alpha_g$ : ضریب جذب شیشه،  $I(t)$ : شدت تابش خورشید برحسب  $(\frac{W}{m^2})$ ،  $T_g$ : دمای شیشه برحسب  $(^{\circ}C)$ ،  $T_w$ : دمای آب  $(^{\circ}C)$  و  $T_a$ : دمای هوای محیط  $(^{\circ}C)$  است. موازنه انرژی برای صفحه زیرین آب شیرین کن فعال:

$$\tau_p I + h_4(T_p - T_f) = h_3(T_p - T_w) \quad (2)$$

که  $T_p$ : دمای صفحه زیرین،  $T_f$ : دمای سیال،  $T_w$ : دمای آب بر حسب  $(^{\circ}C)$  بوده و  $T_p$ : ضریب انتقال حرارت تابشی در صفحه زیرین است. موازنه انرژی برای آب:

$$\tau_w I A_p + h_3 A_p (T_p - T_w) + Q_{ac} = M_w C_w \frac{dT_w}{dt} + h_1 A_g (T_w - T_g) \quad (3)$$

که  $T$ : دمای صفحه زیرین برحسب  $(^{\circ}C)$  و  $\tau_w$ : ضریب انتقال حرارت تابشی آب است.

در روابط (۱) الی (۳)،  $h_1, h_2, h_3, h_4$  ضرایب انتقال حرارت جابه جایی در سیستم آب شیرین کن خورشیدی برحسب  $\frac{W}{m^2 k}$  هستند. هم چنین  $Q_{ac}$  گرمای ورودی از هواگرم کن خورشیدی به آب شیرین کن برحسب وات بوده و از رابطه (۴) محاسبه می شود.

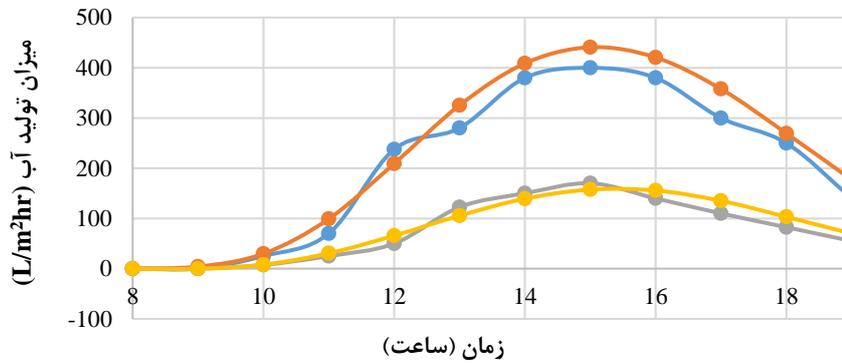
$$Q_{ac} = 2m_{ac} C_{p,air} (T_f - T_a) \quad (4)$$

که  $T_f$ : دمای هوای خروجی از هواگرم کن،  $T_a$ : دمای هوای محیط برحسب  $(^{\circ}C)$ ،  $m_{ac}$ : دبی جرمی هوا در هواگرم کن برحسب  $\frac{kg}{m^2 s}$  و  $C_{p,air}$ : گرمای ویژه هوا برحسب  $\frac{J}{kg^{\circ}C}$  است. هم چنین میزان تولید آب در آب شیرین کن با رابطه (۵) محاسبه می شود (رهبر و اصفهانی، ۱۳۹۲).

$$\dot{m} = (h_{evp}(T_w - T_g)/h_{fg}) \times 3600 \quad (5)$$

ساده ۰/۹۸۹ لیتر بر مترمربع در روز و برای آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن ۲/۴۶۷ لیتر بر مترمربع در روز است که نشان دهنده ۱۵۰٪ افزایش تولید در آب شیرین کن فعال است. خطای متوسط بین نتایج تجربی و تئوری حدود ۱۰٪ است.

کلکتور (L) پارامترهای بسیار مهمی هستند. در شکل ۳ میزان تولید آب در ساعات مختلف برای آب شیرین کن ساده و ترکیب شده با هواگرم کن براساس نتایج تجربی و مدل سازی نشان داده شده است. میزان تولید متوسط آب در روزهای آزمایش بر مبنای نتایج تجربی برای آب شیرین کن

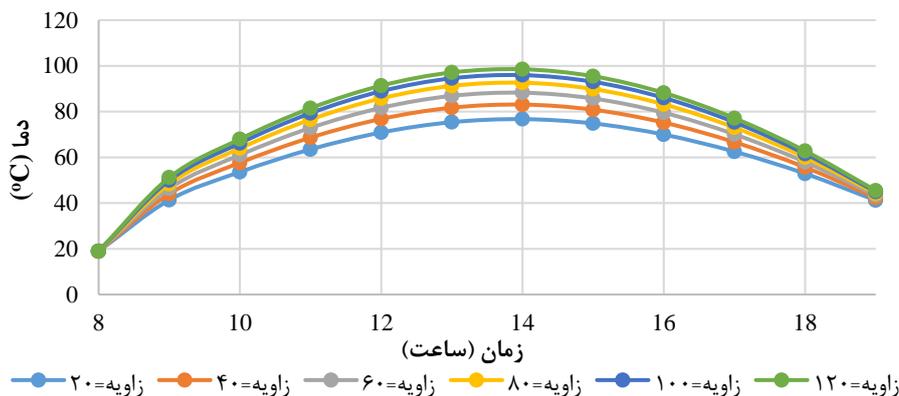


شکل ۳- مقایسه بین نتایج تجربی و تئوری برای تولید آب در آب شیرین کن ساده و آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن خورشیدی

ساعت ۱۴ به حداکثر مقدار خود می رسد و پس از آن به دلیل کاهش شدت تابش خورشید روند کاهشی دارد. با افزایش زاویه صفحه جاذب از ۲۰ درجه تا ۱۲۰ درجه، مقدار متوسط دمای هوای خروجی از هواگرم کن، ۲۵ درصد افزایش می یابد؛ زیرا افزایش زاویه صفحه جاذب سبب افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی شده و انتقال حرارت به هوای درون هواگرم کن افزایش می یابد. با افزایش زاویه ( $\theta$ )، انتقال حرارت تابشی از جاذب به سطوح هواگرم کن افزایش یافته و دمای هوای خروجی از کلکتور افزایش پیدا می کند.

### ۲-۵- اثر زاویه صفحه جاذب بر روی میزان تولید آب شیرین کن

با استفاده از مدل سازی ریاضی، اثر زاویه صفحه جاذب بر روی میزان تولید آب در آب شیرین کن ترکیب شده با هواگرم کن خورشیدی بررسی شد. شکل ۴ دمای هوای خروجی از هواگرم کن خورشیدی را برای زاویه های مختلف صفحه جاذب دنداندار برای روز ۱۳۹۹/۰۵/۳۱ نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود دمای هوای خروجی از هواگرم کن با زمان افزایش یافته و در



شکل ۴- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم کن برای زوایای مختلف صفحه جاذب

در میزان تولید آب مشاهده نمی شود. این امر به دلیل افزایش ناچیز دمای هوای خروجی از هواگرم کن با افزایش زاویه ( $\theta$ ) است. بنابراین به دلیل کم بودن اثر تغییر زاویه صفحه جاذب بر ضریب انتقال حرارت هدایتی و بالطبع آن تغییر ناچیز دمای هوای

در شکل ۵ اثر زاویه صفحه جاذب دنداندار بر روی میزان تولید آب در آب شیرین کن فعال نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زاویه ( $\theta$ ) میزان تولید آب روزانه ۰/۰۷ درصد افزایش داشته که قابل اغماض بوده و تغییرات زیادی

با تغییر ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب ( $H_{g,ac}$ ) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن تا ظهر افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش ارتفاع دندانه‌ها از ۰/۱۵ متر تا ۰/۲ متر، یک کاهش ۱۰/۴ درصدی در دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن مشاهده می‌شود. این کاهش ناشی از کاهش انتقال حرارت از جاذب به هوای درون هواگرم‌کن است.

تغییرات میزان آب تولیدشده در آب‌شیرین‌کن برحسب تغییرات ارتفاع دندانه صفحه جاذب هواگرم‌کن در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع دندانه ( $H_{g,ac}$ ) از ۰/۱۵ متر تا ۰/۲ متر میزان تولید آب ۰/۰۳ درصد کاهش یافته است. میزان تأثیر ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب بر روی میزان تولید آب به دلیل تغییرات ناچیز دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن با تغییر ارتفاع دندانه‌های جاذب، کم است که علت این امر نیز به دلیل کاهش انتقال حرارت به هوای درون کانال با افزایش ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب است؛ زیرا افت فشار ناشی از افزایش بیش از حد ارتفاع دندانه‌ها در کاهش انتقال حرارت موثر است.

خروجی از هواگرم‌کن با تغییر زاویه جاذب، افزایش قابل توجهی در دمای آب درون تشتک آب‌شیرین‌کن و نرخ تولید آب رخ نمی‌دهد.

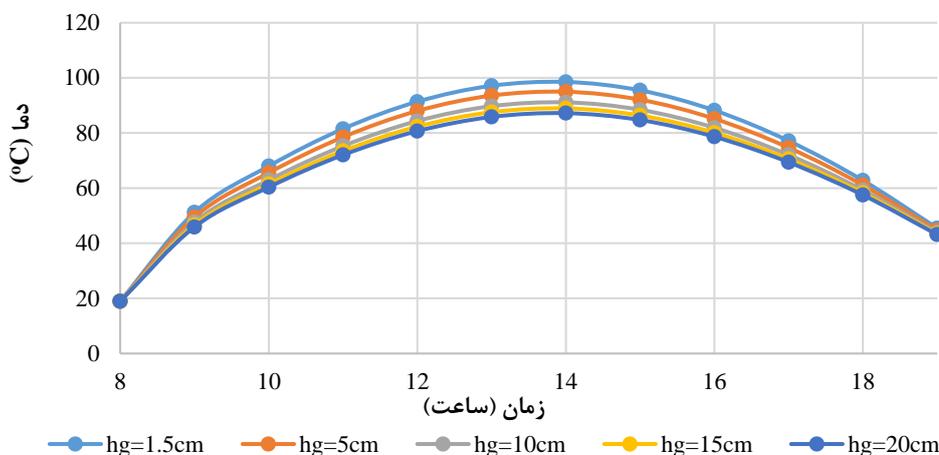


شکل ۵- تغییرات میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن با تغییر زاویه استقرار صفحه جاذب در هواگرم‌کن خورشیدی

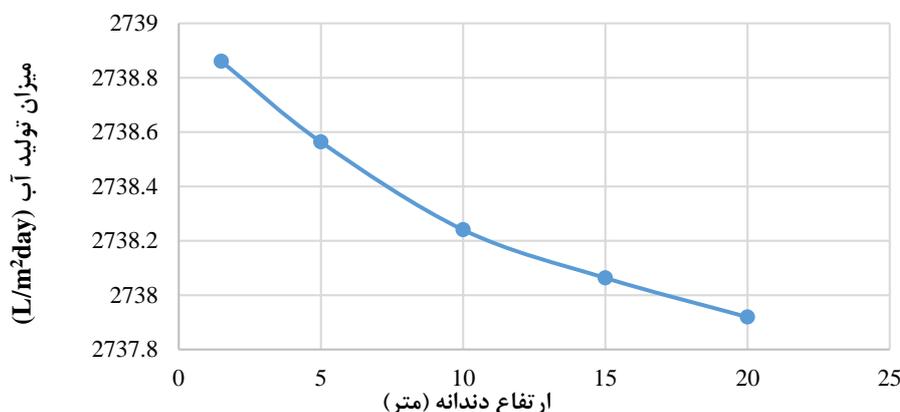
### ۵-۳- اثر ارتفاع دندانه‌های ۷-شکل صفحه جاذب بر

### روی میزان تولید آب‌شیرین‌کن

در شکل ۶ تغییرات دمای خروجی از هواگرم‌کن خورشیدی



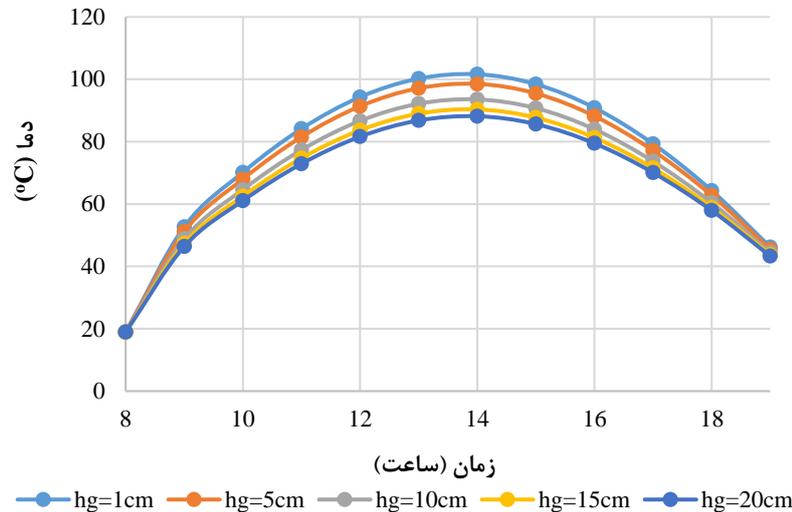
شکل ۶- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن با تغییر ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب



شکل ۷- تغییرات میزان تولید آب‌شیرین‌کن با تغییر ارتفاع دندانه‌های جاذب هواگرم‌کن  $H_g$

بیشینه خود می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد. فاصله بین شیشه و جاذب از ۰/۱ متر تا ۰/۲ متر تغییر کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب ( $H_{c,ac}$ )، دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن ۱۲٪ کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از افت ناچیز ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین شیشه و جاذب در اثر افزایش فاصله بین شیشه و جاذب است.

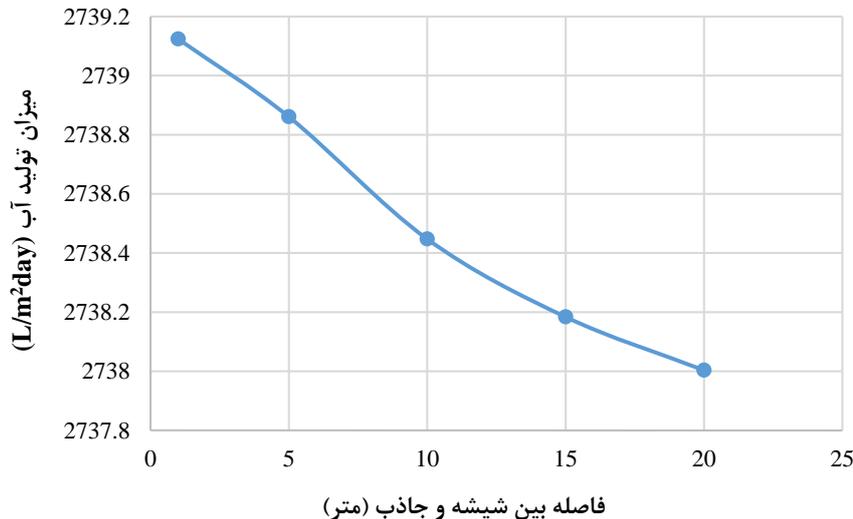
۴-۵- اثر میزان فاصله بین جاذب و شیشه در هواگرم‌کن خورشیدی بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن  
در شکل ۸ دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن برای فواصل مختلف بین شیشه و جاذب نشان داده شده است. براساس نتایج، دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن تا ظهر افزایش یافته و به مقدار



شکل ۸- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن با تغییر فاصله بین شیشه و جاذب در هواگرم‌کن خورشیدی

۰/۰۴ درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات ناچیز به دلیل تغییرات بسیار کم عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در اثر تغییر ناچیز دمای هوای خروجی با افزایش ( $H_{c,ac}$ ) است.

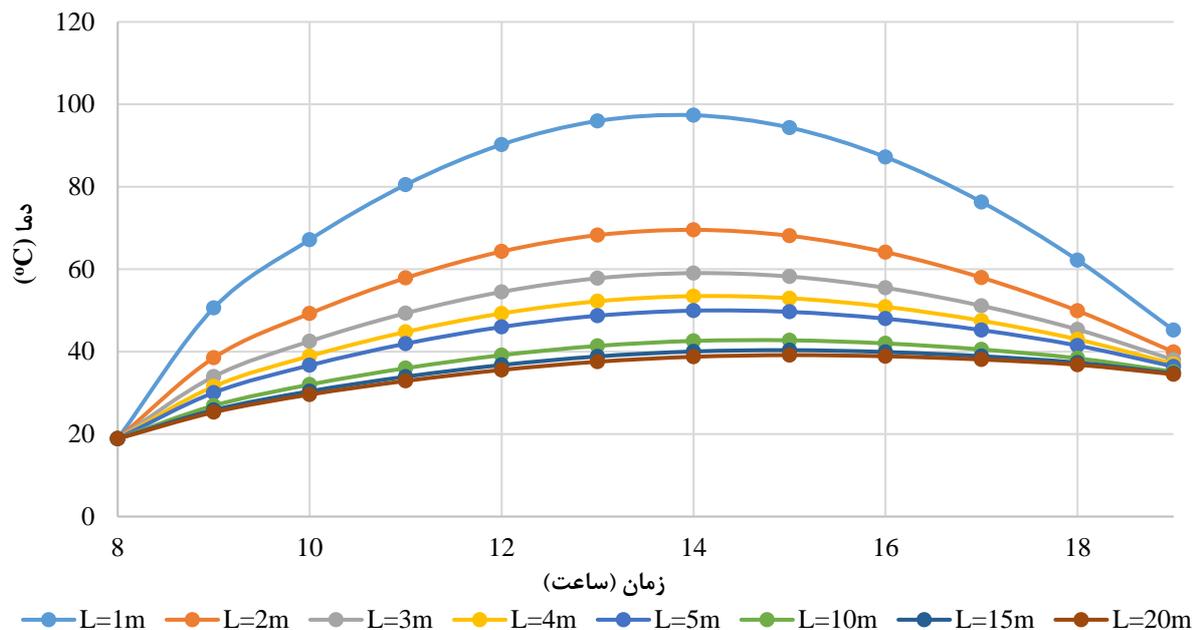
شکل ۹ اثر تغییر فاصله بین شیشه و جاذب را بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن نشان می‌دهد. با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب ( $H_{c,ac}$ ) از ۰/۱ متر تا ۰/۲ متر، میزان تولید آب



شکل ۹- تغییرات میزان تولید آب‌شیرین‌کن با تغییر فاصله بین شیشه و جاذب در هواگرم‌کن  $H_{c,ac}$

افزایش طول هواگرم‌کن از ۱ متر تا ۲۰ متر دمای هوای خروجی از آن ۴۳٪ کاهش یافته است؛ بنابراین با افزایش طول هواگرم‌کن ضریب انتقال حرارت هدایتی بین شیشه و هوا کاهش یافته و طبق معادلات مربوطه دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد.

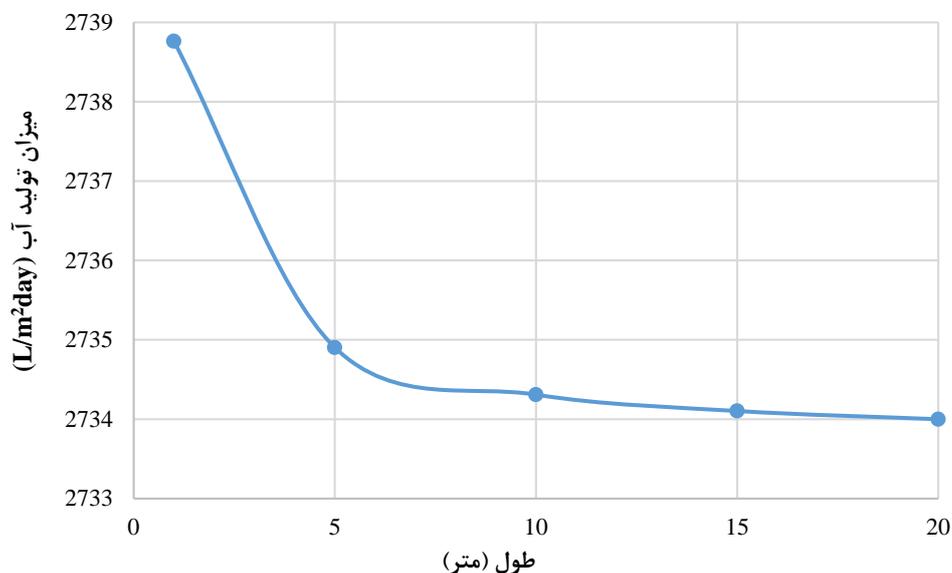
۵-۵- اثر طول هواگرم‌کن بر میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن  
تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن با تغییر طول آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با



شکل ۱۰- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم کن بر حسب طول هواگرم کن

زیرا دمای هوای خروجی از هواگرم کن در طول آن دارای افت بوده و میزان انتقال حرارت از هواگرم کن به آب درون تشتک کاهش یافته و سبب کاهش میزان تولید آب شده است.

شکل ۱۱ تغییرات میزان تولید آب در آب شیرین کن جدید بر حسب طول هواگرم کن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش طول کلکتور، میزان تولید آب ۰/۱۴ درصد کاهش می‌یابد؛

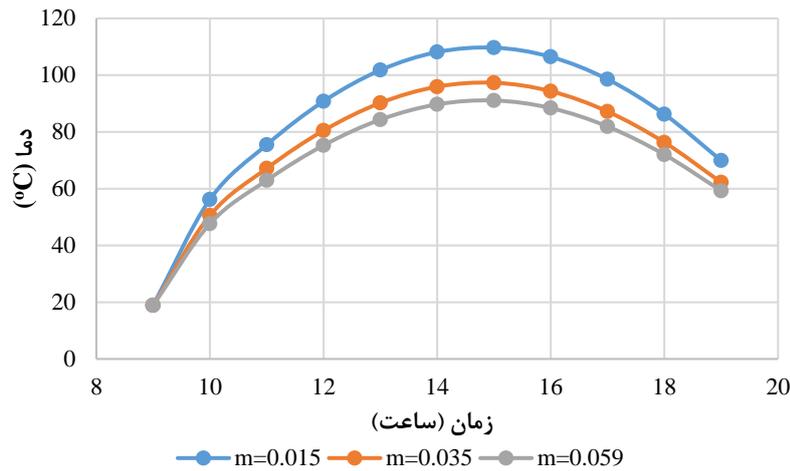


شکل ۱۱- تغییرات میزان تولید آب شیرین کن با تغییر طول هواگرم کن

ورودی از ۰/۱۵ تا ۰/۰۵۹ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه، دمای هوای خروجی از هواگرم کن ۲۵ درصد کاهش یافته است. این امر به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت بین سطوح هواگرم کن و هوای درون کلکتور است. افزایش دبی هوای ورودی به مقادیر بیش از ۰/۰۵۹ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه، اثر قابل توجهی بر روی دمای هوای خروجی از هواگرم کن ندارد.

#### ۵-۶- اثر دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم کن در میزان تولید آب در آب شیرین کن

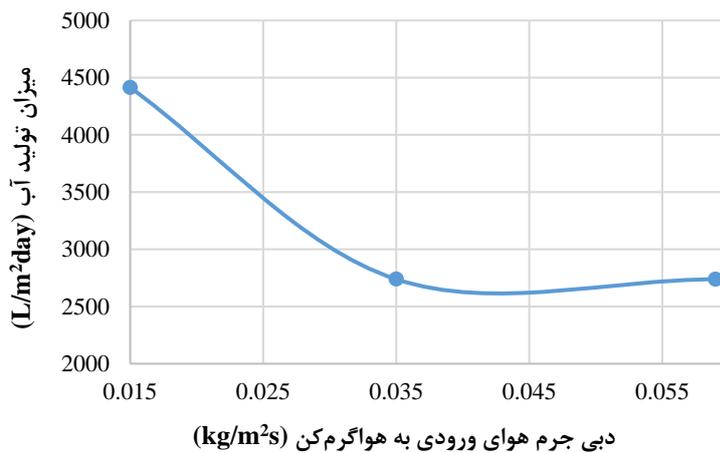
دمای هوای خروجی از هواگرم کن برای سه دبی جرمی مختلف هوای ورودی به هواگرم کن در شکل ۱۲ ارائه شده است. بیشینه دمای هوا در ساعت ۱۴ برای دبی هوای ورودی ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه است. با افزایش دبی جرمی هوای



شکل ۱۲- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن بر حسب دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن

کم هوا و کاهش تولید آنتروپی است که در اثر افزایش دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن که به کانال زیرین آب‌شیرین‌کن جدید وارد می‌شود، بوده و سبب افزایش اختلاف دما بین آب و شیشه می‌شود، بنابراین میزان تولید آب افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۳ اثر دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن نشان داده شده است. با کاهش نرخ دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن از ۰/۰۵۹ تا ۰/۰۱۵ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه، نرخ تولید آب ۶۱٪ افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل افزایش دمای آب در دبی‌های جرمی



شکل ۱۳- تغییرات میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن جدید بر حسب دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن

#### ۶- نتیجه‌گیری

آب ۱۴٪ درصد کم شده است.

- با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به هواگرم‌کن، دمای هوای خروجی از آن ۲۵٪ کاهش داشته و میزان تولید آب ۶۱٪ در آب‌شیرین‌کن فعال کاهش می‌یابد.

- با افزایش زاویه دندانه‌های صفحه جاذب هواگرم‌کن در آب‌شیرین‌کن فعال بین ۲۰ و ۱۲۰ درجه، دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن ۲۵٪ افزایش داشته؛ درحالی‌که میزان تولید آب فقط ۰/۰۷ درصد افزایش یافته است.

#### ۷- پیشنهادها برای کارهای آینده

نتایج حاصل از این تحقیق، افق جدیدی را در بررسی و مدل‌سازی ترمودینامیکی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به خصوص آب‌شیرین‌کن‌های ترکیب‌شده با هواگرم‌کن خورشیدی گشوده که لازم است تحقیقات وسیع‌تری برای عمق‌بخشیدن به آن و

- با افزایش ارتفاع دندانه‌های جاذب هواگرم‌کن، دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن ۱۰/۴ درصد کاهش یافته؛ درحالی‌که میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن جدید ۰/۰۳ درصد کاهش داشته است.

- با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب در هواگرم‌کن، دمای هوای خروجی از هواگرم‌کن ۴۳٪ کاهش داشته و میزان تولید

- <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28297>.  
Azari, P., Lavasani, A. M., Rahbar, N., and Yazdi, M.E., (2022), "Performance enhancement of a solar still using a V-groove solar air collector, Experimental study with energy, exergy, enviroeconomic, and exergoeconomic analysis", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(37), 56885-56885, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21397-2>.
- Azari, P., Mirabdollah Lavasani, A., Rahbar, N., and Eftekhari Yazdi, M., (2022), "Combination of a v-grooved solar collector with a single slope solar still: Performance evaluation, mathematical modeling, and economic analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(15), 8731-8753, <https://doi.org/10.1177/09544062221081297>.
- Chang, Z., Yang, J., Chu, Y., Hou, J., and Su, Y., (2025), "Energy, exergy and economic analysis of a novel immersion tapered solar still for combination with solar concentrator", *Desalination*, 601, 118560, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118560>.
- Eltawil, M.A., and Omara, Z.M., (2014), "Enhancing the solar still performance using solar photovoltaic, flat plate collector and hot air", *Desalination*, 349, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.021>.
- Poblete, R., Salihoglu, G., and Salihoglu, N.K., (2016), "Investigation of the factors influencing the efficiency of a solar still combined with a solar collector", *Desalination and Water Treatment*, 57(60), 29082-29091, <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1202872>.
- Rahbar, N., and Esfahani, J.A., (2013), "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis", *Energy*, 49, 289-297, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.023>.
- Sai, P.V., and Reddy, K.S., (2024), "Theoretical and experimental investigations of inclined solar still using secondary reflectors on east-west for enhanced distillate yield", *Applied Thermal Engineering*, 236, 121836, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121836>.
- Samimi, M., and Moghadam, H., (2024), "Investigation of structural parameters for inclined weir-type solar stills", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 113969, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113969>.
- Tei, E.A., Hameed, R.M. S., Ilyas, M., and Athikesavan, M.M., (2024), "Experimental investigation of inclined solar still with and without sand as energy storage materials", *Journal of Energy Storage*, 77, 109809, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109809>.
- دستیابی به نتایج دقیق‌تر صورت‌گیرد. به‌عنوان مثال می‌توان موارد زیر را برای ادامه کار در این زمینه پیشنهاد داد:
- بررسی تأثیر جنس و نوع بدنه آب‌شیرین‌کن و هواگرم‌کن بر کارایی سیستم؛
  - بررسی اثر استفاده از مواد تغییردهنده فاز در زیر هواگرم‌کن بر روی میزان تولید آب در آب‌شیرین‌کن؛
  - بهینه‌سازی آب‌شیرین‌کن‌های ترکیب‌شده با هواگرم‌کن خورشیدی؛
  - بررسی شیب شیشه به‌صورت هم‌زمان در آب‌شیرین‌کن و هواگرم‌کن بر ساختار جریان درون آب‌شیرین‌کن و ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و تبخیر؛
  - بررسی بیش‌تر در مورد تأثیر شرایط محیطی و حرارتی در کارایی آب‌شیرین‌کن ترکیب‌شده با هواگرم‌کن خورشیدی؛
  - بررسی تأثیر تغییر ارتفاع محل استقرار آب‌شیرین‌کن خورشیدی ترکیب‌شده با هواگرم‌کن خورشیدی بر کارایی سیستم؛
  - بررسی امکان استفاده از سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق فن مربوط به هواگرم‌کن خورشیدی در آب‌شیرین‌کن ترکیب‌شده با هواگرم‌کن.

## ۸- مراجع

- هاشم‌پور، ف.، پرداختی، ع.، و جمشیدی، ش.، (۱۴۰۳)، "برآورد پیامدهای محیط‌زیستی تجمعی سامانه‌های نمک‌زدایی برمبنای شاخص‌های ReCiPe مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹(۱)، ۱۹-۳۱، <http://doi.org/10.22112/jwwse.2023.364061.1328>
- صراف‌زاده، م.ح.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی فنی و اقتصادی روش‌های نمک‌زدایی از آب دریا با در نظر گرفتن ویژگی‌های بومی در نقاط مختلف دنیا"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۱)، ۲۸-۳۷، <http://doi.org/10.22112/jwwse.2017.89834.1030>.
- Abdelgaied, M., Attia, M.E.H., Arıcı, M., and Abdel-Aziz, M.M., (2023), "Performance enhancement of a conical solar still by optimizing inclination angle", *Solar Energy*, 264, 112001, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112001>.
- Abdullah, A.S., (2013), "Improving the performance of stepped solar still", *Desalination*, 319, 60-65, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.003>.
- Azari, P., Lavasani, A.M., Rahbar, N., and Yazdi, M.E., (2022), "The effect of air flow on solar stills performance: A review", *Desalination and Water Treatment*, 256, 1-17,



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.