



Research paper

(Received 4 Aug. 2025

Accepted 6 Oct. 2025)

Design, Construction, and Evaluation of an Innovative Solar Distillation System for Water Purification: A Case Study in Sirjan

Hassan Mansouri¹, Rahim Shamsoddini*², Ehsan Hasanzaim³

¹ Master's student in Renewable Energy Engineering, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology

² Associate Professor, Department of Energy Conversion and Systems, Faculty of Materials and Mechanics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Abstract

This study designed and constructed an innovative solar distillation system with an emphasis on extremely low cost, ease of construction, and the use of locally available materials. It was tested under real-world climatic conditions in Iran, specifically in the city of Sirjan. The system's primary goal is to produce safe drinking water from contaminated sources without relying on fossil fuels or grid electricity. The key innovation lies not in thermodynamic principles, but in the practical feasibility of a truly affordable solution built using recycled and readily obtainable parts. Experiments were conducted during summer and autumn, using an initial water volume of 500 cc under various environmental conditions. Parameters such as ambient temperature, initial water temperature, and the volume of distilled water produced were recorded. Results indicated that the system's thermal performance is dependent on solar radiation. Under optimal conditions (midday on a clear summer day), it achieved an overall thermal efficiency of 19.6%, which is a commendable efficiency given its minimal construction cost. Microbiological tests confirmed the system's ability to completely purify water; total coliform counts dropped from 100 CFU/100ml in the input water to zero in the treated output. The innovative use of discrete mosaic mirrors, instead of a continuous parabolic mirror, played a key role in reducing cost while maintaining performance. Due to its simple construction, energy independence, and proven effectiveness, this technology offers a sustainable, practical, and cost-effective solution for providing safe drinking water in arid regions of the country.

Keywords: Water purification, Solar energy, Distillation, Contaminated water, Safe drinking water

* Corresponding Author: Rahim Shamsoddini
Email: shamsoddini@kgut.ac.ir
Phone: 09131989256



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۳

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه نوآورانه تقطیر خورشیدی برای تصفیه آب: مطالعه

موردی در سیرجان

حسن منصوری ده شعبی^۱، رحیم شمس الدینی^{۲*}، احسان حسن زعیم^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدید پذیر، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان

^۲ دانشیار، گروه تبدیل و سیستم های انرژی، دانشکده مواد و مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

چکیده

در این پژوهش، یک سامانه تقطیر خورشیدی نوآورانه با رویکردی مبتنی بر هزینه بسیار پایین، سادگی ساخت و قابلیت پیاده‌سازی با مصالح بومی طراحی و ساخته شد و در شرایط اقلیمی واقعی ایران، به ویژه در شهر سیرجان، مورد آزمون عملی قرار گرفت. هدف اصلی سامانه، تولید آب آشامیدنی سالم از منابع آلوده بدون نیاز به انرژی فسیلی یا شبکه برق است. نوآوری کلیدی این کار، نه در اصول ترمودینامیکی، بلکه در امکان‌سنجی عملی یک راهکار واقعاً مقرون‌به‌صرفه با استفاده از قطعات بازیافتی و موجود است. آزمایش‌ها در فصول تابستان و پاییز، با حجم اولیه ۵۰۰ سی‌سی آب و در شرایط محیطی مختلف انجام شد. پارامترهایی مانند دمای محیط، دمای اولیه آب و میزان آب تقطیر شده ثبت گردید. نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی سامانه به شرایط تابش خورشید وابسته است و در شرایط بهینه (ظهر یک روز صاف تابستانی) به راندمان حرارتی کلی ۱۹/۶٪ دست یافت که با توجه به هزینه ساخت بسیار کم، کارایی قابل قبولی دارد. آزمون‌های میکروبیولوژی نیز توانایی سامانه در گندزدایی کامل آب را تأیید کردند؛ شمارش کلیفرم‌ها از CFU/100ml ۱۰۰ در آب ورودی به صفر در آب تصفیه شده کاهش یافت. استفاده نوآورانه از آینه‌های موزاییکی گسسته به جای آینه مقعر پیوسته، نقش کلیدی در کاهش هزینه و حفظ کارایی سامانه داشت. با توجه به سادگی ساخت، استقلال از شبکه برق و کارایی اثبات‌شده، این فناوری راهکاری پایدار، عملی و مقرون‌به‌صرفه برای تأمین آب شرب سالم در مناطق کم‌آب کشور ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تصفیه آب، انرژی خورشیدی، تقطیر، آب آلوده، آب سالم

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به دلیل در دسترس بودن، تجدیدپذیری و ماهیت تقریباً بی‌نهایت خود، یکی از مناسب‌ترین منابع برای تأمین نیازهای انرژی در جهان به شمار می‌رود. ایران با میانگین بیش از ۳۰۰ روز آفتابی در سال، از ظرفیت بسیار بالایی برای بهره‌گیری از این منبع برخوردار است. استفاده از فناوری‌های خورشیدی در فرآیندهای تقطیر و تصفیه آب، به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب کشور، راهکاری کارآمد، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای تولید آب شیرین محسوب می‌شود. از این‌رو در کار حاضر یک طرح نوآورانه و کم‌هزینه برای تصفیه آب برای شرایط اقلیمی ایران به ویژه شهرها و مناطق حاشیه کویر ارائه می‌شود. در ادامه، ابتدا به اهمیت موضوع و پیشینه تاریخی بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در فرآیندهای تقطیر پرداخته می‌شود، سپس مفاهیم نظری مرتبط با کار حاضر مورد بررسی قرار گرفته و در پایان، ایده اصلی تحقیق تبیین خواهد شد.

۱-۱- اهمیت تحقیق و پیشینه مطالعات

آب به‌عنوان عنصری حیاتی برای بقا و پایداری حیات، نقشی غیرقابل انکار در تمام ابعاد زندگی بشری ایفا می‌کند. از مصرف روزانه جهت آشامیدن و بهداشت فردی گرفته تا نقش کلیدی در کشاورزی، صنایع و تولید انرژی، همگی وابسته به وجود منابع پایدار و سالم آب هستند. امروزه، با افزایش سریع جمعیت جهانی، توسعه فزاینده شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های صنعتی و همچنین تأثیرات فزاینده تغییرات اقلیمی، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع آب شیرین وارد شده است. دسترسی به آب آشامیدنی سالم، که در گذشته یک حق بديهی و عمومی تلقی می‌شد، اکنون به یکی از اساسی‌ترین دغدغه‌های جهانی بدل شده است.

بر اساس گزارش‌های معتبر بین‌المللی، نیاز سالانه هر فرد به آب آشامیدنی در حدود ۱۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است. با این حال، در بسیاری از نقاط جهان، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، این نیاز به‌طور کامل برآورده نمی‌شود. گزارش برنامه جهانی پایش آب نشان می‌دهد که حدود ۳/۷ میلیارد نفر در حال حاضر با کمبود آب آشامیدنی مواجه هستند [۱]. این بحران نه‌تنها تهدیدی برای سلامت عمومی است، بلکه چالشی عمده برای امنیت غذایی، توسعه اقتصادی و ثبات اجتماعی محسوب می‌شود.

پیش‌بینی نهادهای بین‌المللی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، تقاضا برای آب شهری ممکن است تا ۸۰ درصد افزایش یابد، در حالی که تعداد افراد فاقد دسترسی به آب آشامیدنی ایمن به بیش از ۲ میلیارد نفر خواهد رسید [۲]. هم‌زمان، برداشت جهانی آب از حدود ۵۰۰ کیلومتر مکعب در سال ۱۹۰۰ به بیش از ۴۶۰۰ کیلومتر مکعب در دهه اخیر رسیده و انتظار می‌رود این رقم تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۶۰۰۰ کیلومتر مکعب افزایش یابد [۳]. این روند فزاینده، که عمدتاً ناشی از رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و افزایش شهرنشینی است، در بسیاری از مناطق جهان منجر به بروز تنش‌های شدید آبی شده است. به‌ویژه آنکه حدود ۷۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر جهانی صرف کشاورزی می‌شود و این سهم در کشورهای در حال توسعه به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد [۴]. علاوه بر این، تفاوت قابل‌توجهی در سرانه مصرف آب میان کشورهای مختلف مشاهده می‌شود؛ برای نمونه، میانگین مصرف روزانه آب خانگی در مصر حدود ۲۰۰ لیتر و در کانادا حدود ۲۲۰ لیتر برآورد شده است [۵]. این نابرابری‌ها، ضرورت به‌کارگیری فناوری‌های بومی‌سازی‌شده و کم‌هزینه مانند سیستم‌های خورشیدی برای نمک‌زدایی و تصفیه آب را به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. از سوی دیگر، انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و در دسترس‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت بسیار بالایی در تولید حرارت برای فرآیندهای تبخیری دارد. اجاق‌های خورشیدی، که اساساً برای پخت غذا و جوشاندن آب طراحی شده‌اند، می‌توانند با اندکی تغییر در ساختار و عملکرد، به‌عنوان منبع حرارتی در سامانه‌های تصفیه آب نیز به کار روند. اجاق‌های خورشیدی انواع مختلفی دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اجاق خورشیدی سهموی، اجاق لوله تحت خلأ و اجاق خورشیدی غیرمستقیم اشاره کرد. هر یک از این طراحی‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند؛ اما اجاق خورشیدی سهموی به دلیل قدرت بالای تمرکز نور و تولید سریع حرارت، گزینه‌ای مناسب برای فرآیندهای حرارتی تصفیه آب به شمار می‌رود [۶ و ۷].

آروناچالا^۱ و کونداپور^۲ در مطالعه‌ای مروری به تحلیل گسترده‌ای از انواع فناوری‌های پخت‌وپز خورشیدی با تمرکز بر راهکارهای اقتصادی و کاربردی در مناطق کم‌برخوردار پرداخته‌اند [۸]. این پژوهش با بررسی طراحی‌ها و عملکرد اجاق‌های خورشیدی جعبه‌ای،

^۱Arunachala

^۲Kundapur

سهامی و هیبریدی، جنبه‌هایی همچون بازده حرارتی، دوام، هزینه ساخت، سهولت استفاده و میزان پذیرش اجتماعی را ارزیابی می‌کند. نویسندگان ضمن شناسایی موانعی چون نبود آگاهی عمومی، ضعف در زیرساخت‌های حمایتی و چالش‌های فرهنگی، بر اهمیت بومی‌سازی فناوری و آموزش کاربران تأکید می‌ورزند. نتیجه‌گیری مقاله بر آن است که توسعه و گسترش اجاق‌های خورشیدی ساده و مقرون‌به‌صرفه، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، می‌تواند به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، بهبود بهداشت خانوار و ارتقای امنیت غذایی کمک شایانی کند.

شارون^۱ و ردی^۲ نیز به بررسی جامع فناوری‌های مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. آن‌ها سیستم‌های حرارتی و غشایی را دسته‌بندی، عملکرد و بازده آن‌ها را مقایسه، و چالش‌ها و مزایای هر روش را تحلیل کردند. همچنین نقش سیستم‌های هیبریدی و کاربرد این فناوری‌ها در مناطق خشک و پرتابش را مورد تأکید قرار دادند [۹].

با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور ایران و تابش قابل توجه خورشیدی در اغلب مناطق آن، توسعه سامانه‌های تصفیه آب خورشیدی می‌تواند گامی مهم در جهت تأمین آب سالم در مناطق کم‌برخوردار، روستاها و مناطق دورافتاده باشد. همچنین ساخت و بهره‌برداری از این‌گونه سامانه‌ها، با توجه به سادگی، هزینه پایین، عدم نیاز به اپراتور متخصص و قابلیت استفاده در خارج از شبکه برق، می‌تواند راهکاری پایدار، اقتصادی و زیست‌محیطی برای مقابله با بحران جهانی آب ارائه دهد.

۱-۲- مبانی نظری تحقیق

بر اساس گزارش برنامه جهانی آب، تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی فشار قابل توجهی بر منابع آب شیرین وارد کرده و امنیت آبی در سطح جهان را با تهدید جدی مواجه کرده است [۱۰]. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بحرانی‌تر است و نیاز به راهکارهای پایدار و کم‌هزینه برای تأمین آب آشامیدنی را دوچندان می‌کند. انرژی خورشیدی به دلیل دسترس‌پذیری گسترده، رایگان بودن و پایداری آن، به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و کارآمد برای فرآیندهای نمک‌زدایی و تصفیه آب مطرح شده است [۱۱].

اجاق‌های خورشیدی سهامی با طراحی ویژه، قادر به تمرکز پرتوهای نور خورشید بر یک نقطه کانونی هستند. این تمرکز انرژی منجر به ایجاد دماهای بسیار بالا در نقطه کانونی می‌شود که توانایی کافی برای تبخیر آب و جداسازی املاح و آلاینده‌ها را فراهم می‌کند [۱۲، ۱۳]. این روش نه تنها از لحاظ مصرف انرژی کارآمد است، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست‌محیطی مرتبط با فرآیندهای تصفیه آب سنتی کمک می‌کند.

چارچوب نظری پژوهش حاضر بر اصول انتقال حرارت، به‌ویژه انتقال حرارت تابشی و تمرکز پرتوهای خورشیدی استوار است. در این چارچوب، فرضیات زیر مطرح می‌شوند:

۱- تمرکز انرژی خورشیدی در نقطه کانونی دیش سهامی، دمای لازم برای تبخیر و تصفیه آب را فراهم می‌کند و قابلیت نمک‌زدایی موثر را دارد.

۲- استفاده از مواد بومی و بازیافتی در ساخت اجاق، علاوه بر کاهش هزینه‌های اولیه، امکان تولید و نگهداری محلی دستگاه را نیز فراهم می‌آورد.

۳- ترکیب اجاق سهامی با فرآیند تقطیر ساده، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار، اقتصادی و کم‌هزینه برای تأمین آب آشامیدنی سالم در مناطق کم‌آب و محروم ارائه شود.

پژوهش حاضر بر طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک سامانه تصفیه آب مبتنی بر اجاق خورشیدی سهامی تمرکز دارد. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در به‌کارگیری رویکردی مهندسی برای طراحی، بومی‌سازی و ارزیابی عملکرد یک سامانه کم‌هزینه است که با استفاده از مواد بازیافتی و در دسترس نظیر دیش‌های ماهواره مستعمل و آینه‌های متداول در کنار بهره‌گیری از سامانه‌های تقطیر سنتی، به‌منظور تأمین آب در مناطق محروم و کم‌آب توسعه یافته است. از این‌رو، در ادامه ابتدا فرآیند ساخت و مونتاژ دستگاه تشریح می‌شود و سپس عملکرد آن طی یک دوره شش‌ماهه به‌صورت تفکیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

^۱Sharon

^۲Reddy

۲- مواد و روش‌ها

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، مطالعات متعددی در زمینه طراحی و ارزیابی عملکرد اجاق‌های خورشیدی در دهه‌های گذشته صورت گرفته است. پژوهش‌های پیشین عمدتاً معطوف به واکاوی پارامترهای فنی از قبیل زاویه تابش، جنس سطح جاذب، نوع متمرکزکننده و نیز شاخص‌های مرتبط با عملکرد حرارتی بوده‌اند. با این حال، خلأهایی همچون فقدان آموزش جامع و گام‌به‌گام ساخت اجاق‌های خورشیدی، استفاده از مواد اولیه در دسترس و کم‌هزینه، و نیز تمرکز بر جنبه‌های کاربردی و بومی‌سازی فناوری در مقیاس‌های خانگی و محلی، همچنان در ادبیات موجود به چشم می‌خورد.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأها، به طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک نمونه اجاق خورشیدی سهموی پرداخته است که در آن از تکنیک آینه‌کاری گسترده و منظم برای افزایش تمرکز انرژی تابشی استفاده شده است. این سامانه نه تنها از نظر عملکرد حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته، بلکه تلاش شده است در طراحی آن اصول سادگی ساخت، قابلیت تولید محلی، و هزینه پایین نیز لحاظ گردد تا امکان استفاده از آن در مناطق فاقد زیرساخت صنعتی فراهم شود.

از جمله نوآوری‌ها و مزایای برجسته این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از مواد اولیه ارزان‌قیمت و در دسترس

در ساخت اجاق، از مصالحی همچون آینه‌های معمولی، فلزات سبک، شیشه بازیافتی و عایق‌های حرارتی بومی استفاده شده است تا امکان ساخت دستگاه با کم‌ترین هزینه و در مناطق محروم نیز فراهم گردد.

- قابلیت بالای ارتقاء و توسعه‌پذیری

طراحی ماژولار اجاق به‌گونه‌ای صورت گرفته است که قابلیت افزایش ابعاد، تعویض قطعات و ارتقاء سامانه به نسخه‌های نیمه‌صنعتی وجود دارد.

- توانایی تصفیه و شیرین‌سازی آب آلوده و غیرقابل شرب

سامانه طراحی شده قادر است حتی از آب‌های سطحی آلوده یا آب دریا، آب آشامیدنی کاملاً بهداشتی و ایمن تولید نماید که این ویژگی برای استفاده در شرایط بحران یا مناطق فاقد زیرساخت تصفیه بسیار حیاتی است.

- استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع تجدیدپذیر

طراحی کاملاً مستقل از شبکه برق باعث شده است این سامانه به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و سبز برای تولید حرارت و آب شیرین در مناطق آفتاب‌خیز مطرح شود.

- هزینه پایین تعمیر و نگهداری

استفاده از قطعات ساده، طراحی باز و قابل دسترسی، و عدم نیاز به تخصص بالا در مونتاژ و تعمیر دستگاه، هزینه‌های نگهداری را به حداقل رسانده است.

این تحقیق در تلاش است راهکارهایی عملی و قابل پیاده‌سازی برای کاهش بحران آب در مناطق کم‌برخوردار ارائه دهد. با توسعه بیشتر این فناوری، امکان استفاده گسترده آن در جوامع روستایی، مناطق بیابانی و حتی در شرایط بحران انسانی نظیر بلایای طبیعی و اردوگاه‌های اضطراری وجود خواهد داشت.

با توجه به این که بخش عمده‌ای از هزینه‌های مربوط به طراحی و ساخت سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی به ساخت متمرکزکننده‌های سهموی اختصاص دارد، تلاش برای کاهش هزینه‌ها بدون افت راندمان، از اولویت‌های اساسی در طراحی سیستم حاضر بوده است. در همین راستا، در این تحقیق به‌جای ساخت متمرکزکننده‌های پرهزینه از ابتدا، از گیرنده‌های ماهواره‌ای (دیش) موجود در بازار که به‌طور صنعتی تولید و در دسترس هستند، به‌عنوان بازتاب‌دهنده سهموی استفاده شده است. این راهکار علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌های ساخت، موجب کاهش زمان طراحی و مونتاژ نیز شده است.

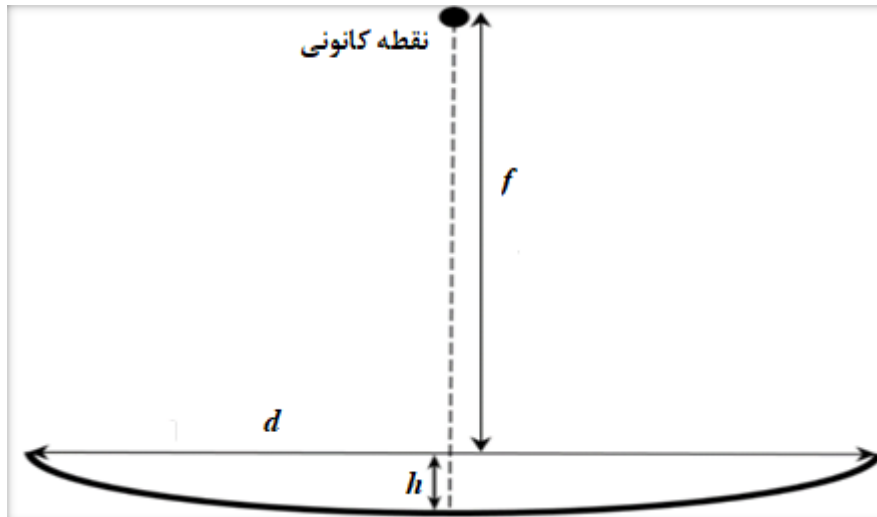
قطر بازتابنده مورد استفاده در این تحقیق ۸۶ سانتی‌متر بوده و سطح داخلی آن با آینه‌کاری دقیق و منظم پوشانده شده تا بیشترین بازتابش نور خورشید و تمرکز آن در نقطه کانونی حاصل شود. یکی از نکات کلیدی در بهره‌برداری صحیح از این نوع متمرکزکننده‌ها،

تعیین دقیق محل کانونی متمرکزکننده است، چرا که جاذب حرارتی باید دقیقاً در این نقطه قرار گیرد تا بیشترین جذب انرژی تابشی صورت گیرد و اتلاف حرارتی به حداقل برسد.

محل کانونی متمرکز کننده با استفاده از رابطه هندسی مربوط به منحنی سهموی به دست می‌آید که در معادله (۱) نمایش داده شده است.

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (1)$$

این معادله، فاصله کانونی (f) را بر حسب قطر (d) و عمق (h) متمرکز کننده محاسبه می‌کند. در شکل ۱ متمرکز کننده و پارامترهای هندسی آن نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک متمرکز کننده و نقطه کانونی

برای ساخت متمرکزکننده، سطح داخلی صفحه مقعر (گیرنده ماهواره‌ای) به عنوان پایه‌ای برای بازتاب‌دهنده‌های نور خورشید مورد استفاده قرار گرفته و با تکه‌های آینه‌ای منظم و هم‌راستا به دقت پوشش داده شده است (شکل ۲). این پوشش آینه‌ای با هدف افزایش بازتاب نور خورشید و تمرکز حداکثری آن در نقطه کانونی، به صورت منظم و با رعایت انحنای سهموی سطح مقعر، نصب گردیده است. این روش که پیش‌تر نیز توسط محققانی چون احمد و همکاران [۱۴] در طراحی اجاق‌های خورشیدی سهموی پیشنهاد شده، مزایای متعددی از جمله کاهش هزینه، سهولت اجرا، افزایش دقت تمرکز نور خورشید و دسترسی آسان به مواد اولیه را به همراه دارد. با تعیین دقیق نقطه کانونی، جاذب در محل مناسب نصب شده و فرآیند انتقال انرژی حرارتی با حداکثر راندمان انجام می‌گیرد.

فرمول مذکور بر پایه‌ی معادله‌ی استاندارد یک سهمی با فرم $x^2 = 4py$ استخراج شده است. این نوع معادله بیانگر سهمی‌ای با محور تقارن عمودی است که در کاربردهای نوری، به‌ویژه در طراحی سطوح سهموی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختار، نقطه‌ی کانونی سهمی محل تمرکز پرتوهای موازی نور خورشید پس از بازتاب از سطح دیش می‌باشد. از این خاصیت برای تعیین موقعیت بهینه‌ی بازوی نگهدارنده‌ی ظرف آب و همچنین برای استقرار دستگاه تقطیر استفاده می‌شود، تا حداکثر جذب انرژی خورشیدی و کارایی حرارتی حاصل گردد. معادله‌ی سهمی نشان‌دهنده‌ی محل تجمع پرتوهای موازی نور خورشید در نقطه‌ی کانونی است. این نقطه به عنوان محل تمرکز انرژی تابشی، مبنای تعیین موقعیت بهینه‌ی بازوی نگهدارنده‌ی ظرف آب و همچنین استقرار دستگاه تقطیر قرار می‌گیرد.

در کار حاضر، با توجه به ابعاد هندسی دیش متمرکزکننده شامل قطر ۸۶ سانتی‌متر و عمق ۸ سانتی‌متر، مقدار فاصله کانونی (f) محاسبه شد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌ها، مقدار فاصله کانونی برابر با $57,7 \pm 1,5$ سانتی‌متر به دست می‌

آید. این سامانه در اصل به‌عنوان یک گیرنده حرارتی یا اجاق خورشیدی عمل می‌کند که نقطه کانونی آن در فاصله مشخص شده قرار دارد.

اجاق‌های خورشیدی سهموی قادر به دستیابی به دماهای بالای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد هستند که این مقدار در مقایسه با سایر انواع اجاق‌های خورشیدی متمرکزکننده، بالاترین بازده حرارتی را ارائه می‌دهد [۱۴]. در مقابل، سیستم‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولاً بازده حرارتی کمتری دارند. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای نشان داده است که بازده حرارتی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی بدون اصلاح حدود ۵,۶٪ و با اصلاح به ۹,۴٪ افزایش یافته است [۱۵]. بنابراین، از نظر بازده حرارتی، اجاق خورشیدی سهموی در مقایسه با آب‌شیرین‌کن‌های متداول در حد رقابتی و در بسیاری شرایط بالاتر از سامانه‌های ساده‌تر است؛ در حالی که نسبت به سیستم‌های هیبریدی پیشرفته‌تر، بازدهی اندکی پایین‌تر دارد [۱۶]. یکی از چالش‌های اساسی در ساخت اجاق خورشیدی، پوشش‌دهی سطح دیش با یک ماده بازتابنده مناسب است. در نخستین مرحله از آزمایش‌ها، از فویل آلومینیومی براق به‌عنوان ماده بازتابنده استفاده شد. با این حال، نتایج آزمایش نشان داد که این ماده به دلیل ضریب بازتاب پایین، به‌ویژه زمانی که روی سطح خمیده دیش قرار می‌گیرد، عملکرد مطلوبی نداشته و نتوانست دمای لازم برای انجام فرآیند تبخیر را تأمین کند. به منظور رفع این مشکل، استفاده از شیشه‌آینه‌ای به‌عنوان بازتابنده مدنظر قرار گرفت. با توجه به خمیده بودن سطح دیش، نصب صفحات شیشه‌ای تخت بر روی آن با دشواری‌هایی همراه بود. بنابراین، شیشه‌ها به قطعات کوچک‌تر تقسیم شدند تا بتوانند با حداقل میزان برش و تطابق با انحنای دیش، سطح آن را به‌طور کامل بپوشانند. لازم به ذکر است که افزایش تعداد برش‌ها می‌تواند موجب افت عملکرد بازتابی گردد، چراکه لبه‌های برش‌خورده موجب پراکندگی نور و کاهش بازتاب مؤثر می‌شوند.



شکل ۲- نمای آینه کاری شده سطح جاذب

پس از تکمیل تجهیز بازتاب‌دهنده، سامانه قادر است نور خورشید را در نقطه کانونی، که مطابق محاسبات انجام‌شده در فاصله مشخصی از سطح دیش قرار دارد، متمرکز نماید. در این نقطه، به‌دلیل تمرکز تابش خورشیدی، بیشینه دما ایجاد می‌گردد که محل استقرار جاذب حرارتی نیز می‌باشد. در این مرحله، ضروری است که حرارت تولیدشده با حداقل اتلاف انرژی به آب آلوده منتقل شود تا دمای آن تا نقطه جوش (۱۰۰ درجه سلسیوس) افزایش یابد.

با رسیدن آب به دمای جوش، فرآیند تبخیر آغاز می‌شود. در صورتی که بخار حاصل، که از آلودگی‌های فیزیکی و میکروبی تهی است، به‌درستی تقطیر گردد، می‌توان به آب سالم دست یافت. بدین ترتیب، سامانه خورشیدی مذکور می‌تواند به‌عنوان یک واحد تقطیر خورشیدی کارآمد جهت تولید آب سالم از منابع آلوده مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور دستیابی به جذب حرارتی حداکثری در نقطه کانونی و در عین حال کاهش هزینه‌های ساخت، مطابق شکل ۳، از یک ظرف مسی بهره گرفته شد که درون آن یک سیستم تقطیر

سنتی تعبیه گردیده است. انتخاب مس به دلیل رسانایی حرارتی بالا، منجر به انتقال مؤثر حرارت متمرکز شده به آب آلوده می‌شود. علاوه بر آن، استفاده از سامانه تقطیر سنتی ضمن حفظ سادگی طراحی، امکان اطمینان از عملکرد فرآیند تبخیر و میعان را فراهم می‌سازد.



شکل ۳- نمایی از دستگاه تصفیه آب ساخته شده شامل متمرکز کننده، جاذب، سیستم تقطیر، بازوهای نگهدارنده، پایه ها و اتصالات (شکل سمت راست) و نمایی از دستگاه تقطیر (شکل سمت چپ)

این دستگاه بر اساس اصول تبخیر و تقطیر عمل می‌کند. آب‌هایی با میزان شوری متفاوت وارد سامانه شده و از طریق تابش نور خورشید، که توسط صفحات با بازتاب حداکثری جذب می‌شود، گرم می‌گردد. پس از گرم شدن، آب شور موجود در سامانه‌ی آب‌شیرین‌کن شروع به تبخیر می‌نماید. در این فرآیند، نمک، میکروارگانیزم‌ها و سایر ذرات معلق در کف دستگاه باقی می‌مانند و بخار حاصل، عاری از هرگونه ناخالصی خواهد بود. انتقال آب به منظور شیرین‌سازی به صورت ثقلی انجام می‌شود و در نتیجه، مصرف انرژی در این مرحله وجود ندارد. بخار آب تولید شده به سمت بالا حرکت کرده و در بخش زیرین دیگ تقطیر جمع می‌شود. سپس قطرات حاصل از تقطیر، از طریق لوله‌ی خروجی منتقل شده و به آب تصفیه‌شده تبدیل می‌گردند.

سیستم مجهز به یک مکانیزم ردیابی دستی دو محوره است. این مکانیزم به اپراتور اجازه می‌دهد تا هم راستای آزیموت (جهت شرقی-غربی) و هم زاویه ارتفاع (شیب) کلکتور را به صورت مستقل تنظیم کند تا سطح دهانه دیش همواره عمود بر پرتوهای مستقیم خورشید باقی بماند. با توجه به حرکت ظاهری خورشید با سرعت تقریبی ۱۵ درجه در ساعت، در طول تمام آزمایش‌ها، موقعیت کلکتور به صورت دوره‌ای و با بسامد ثابت هر ۱۵ دقیقه یک بار به صورت دستی تنظیم مجدد می‌شود. معیار تنظیم موقعیت، یک روش بصری ساده و مؤثر می‌باشد. اپراتور با مشاهده همزمان دو شاخص، موقعیت دیش را تنظیم می‌کند. موقعیت دیش به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سایه ایجاد شده توسط بازوی نگهدارنده جاذب بر روی سطح آینه‌ها به حداقل ممکن برسد. با این حال مسئله یکی از چالش‌های اصلی می‌باشد. همزمان، اپراتور اطمینان حاصل می‌کند که لکه نورانی شدید ناشی از تمرکز پرتوها، دقیقاً در مرکز سطح مقطع جاذب (کف دیگ) قرار گرفته باشد. تمام آزمایش‌ها در یک فضای باز در حومه شهرستان سیرجان، ایران (با مختصات جغرافیایی تقریبی 29.45° شمالی و 55.68° شرقی، و در ارتفاع ۱۷۳۰ متری از سطح دریا) انجام گرفت. محل آزمایش به گونه‌ای انتخاب شد که هیچ‌گونه سایه‌اندازی از جانب مواع اطراف در طول روز وجود نداشته باشد.

۳- بحث و بررسی نتایج

در فرآیند عملکرد اجاق خورشیدی برای تولید آب تقطیر شده‌ی تمیز، عوامل متعددی به صورت هم‌افزا تأثیرگذار هستند. حجم اولیه‌ی آب که توسط کاربر در محفظه تقطیر ریخته می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا میزان آن مشخص می‌کند که چه مقدار انرژی برای رساندن آب به دمای تبخیر لازم است. دمای اولیه‌ی آب نیز یک پارامتر کلیدی محسوب می‌شود؛ هرچه آب با دمای بالاتری وارد سیستم شود، انرژی کمتری برای تبخیر آن نیاز است، که در نتیجه بازده حرارتی کلی افزایش می‌یابد.

ساختار و طراحی اجاق خورشیدی نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی حرارتی آن دارد. استفاده از مواد با ظرفیت جذب بالا، به‌کارگیری عایق‌های مناسب برای جلوگیری از تلفات حرارتی، و طراحی بهینه‌ی مسیر حرکت بخار و تقطیر، همگی می‌توانند موجب افزایش بهره‌وری سیستم شوند. همچنین، تعیین زاویه‌ی مناسب برای نصب اجاق خورشیدی نسبت به تابش خورشید در منطقه‌ی جغرافیایی مورد نظر، باعث حداکثرسازی دریافت انرژی خورشیدی می‌شود. این زاویه باید بر مبنای عرض جغرافیایی، فصل و ساعات تابش خورشید تنظیم شود تا میزان تابش موثر به سطح جذب‌کننده در بیشترین مقدار ممکن باشد.

در نهایت، تنظیم به‌موقع اجاق خورشیدی در طول بازه‌های زمانی مناسب، به‌ویژه در صورت عدم استفاده از سامانه‌های ردیاب خودکار، اهمیت دارد. این تنظیمات می‌توانند به شکل دستی یا با کمک مکانیزم‌های ساده‌ی چرخشی انجام شوند تا سطح جذب همواره در زاویه‌ای مطلوب نسبت به تابش خورشید باقی بماند و اتلاف انرژی به حداقل برسد. تمامی این عوامل، در کنار یکدیگر، عملکرد نهایی سیستم را از نظر سرعت تبخیر، حجم آب تقطیر شده و کارایی کلی تعیین می‌کنند.

با این مقدمه به سراغ تحلیل نتایج می‌رویم. در جدول ۱ نتایج آزمایشات انجام شده و ثبت شده خروجی از دستگاه نشان داده شده است. در این مجموعه آزمایش‌ها، عملکرد اجاق خورشیدی در ماه‌های مختلف سال (تابستان و پاییز) ارزیابی شده است. تمامی آزمایش‌ها با حجم اولیه ثابت ۵۰۰ سی‌سی آب انجام شده‌اند. پارامترهای گزارش شده شامل دمای محیط، دمای اولیه آب، میزان آب تصفیه شده، انرژی حرارتی مفید (Q_{useful}) مدت زمان آزمایش، تابش متوسط، انرژی خورشیدی ورودی، راندمان حرارتی و شار تقطیر هستند. این اطلاعات امکان تحلیل کمی و کیفی راندمان سیستم را فراهم می‌سازند.

انرژی حرارتی مفید (Q_{useful})، مجموع انرژی محسوس (برای رساندن آب از دمای اولیه به نقطه جوش) و انرژی نهان (برای تبخیر آب) است:

$$Q_{useful} = m_{ini}C_p\Delta T + m_{dist}h_{lv} \quad (2)$$

که در این رابطه m_{ini} جرم اولیه آب، m_{dist} میزان آب تقطیر شده، ΔT اختلاف دمای نقطه جوش و دمای اولیه می‌باشند. ضمناً، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه آب $C_p = 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ و گرمای نهان تبخیر آب $h_{lv} = 2260 \text{ kJ/kg}$ می‌باشد. انرژی ورودی (Q_{in}) از حاصل ضرب تابش مستقیم عمود متوسط ($G_{b,ave}$) در مساحت دهانه کلکتور و بازه زمانی آزمایش (Δt) به دست می‌آید. با توجه به عدم اندازه‌گیری تابش در حین آزمایش، مقدار $G_{b,ave}$ با استفاده از مدل آسمان صاف هاتل^۱ و بر اساس موقعیت جغرافیایی سیرجان برای روز و ساعت آزمایش محاسبه گردید که جزئیات آن در ادامه بحث می‌شود.

جدول ۱: آزمایشات و داده‌ها مزبور

فصل مورد آزمایش	دمای اولیه آب (°C)	میزان آب تصفیه (CC)	انرژی حرارتی مفید (Q_{useful}) (kJ)	مدت زمان آزمایش (ساعت)	تابش متوسط ($G_{b,ave}$) (W/m ²)	انرژی خورشیدی ورودی (Q_{in}) (kJ)	راندمان حرارتی (η_{th})	شار تقطیر (L/m ² /day)
تابستان (شهریور ۱)	۲۷	۲۰۰	۵۱۳/۱	۵/۱۷	۹۵۶/۳	۱۰۳۱۲	۱۵ ± ۱/۱ %	۱/۰۵
پاییز (آبان)	۹	۱۵۰	۳۹۶/۱	۳/۰۰	۹۸۱/۲	۶۱۴۹	۱۶ ± ۱/۳ %	۱/۵۸

^۱ Hottel's Clear-Sky Model

۱/۶۳	% ۱/۴ ± ۱۷	۵۶۱۲	۹۸۷/۲	۲/۷۵	۳۹۰/۴	۱۵۰	۱۴	پاییز (مهر)
۱/۸۵	% ۱/۵ ± ۱۹/۶/	۳۰۷۶	۹۷۶/۵	۲/۵۰	۵۱۱/۴	۲۰۰	۲۹	تابستان (مرداد)
۱/۸۳	% ۱/۱ ± ۱۴/۴	۳۵۳۹	۹۷۰/۱	۱/۷۵	۵۰۸/۴	۲۰۰	۳۰	تابستان (تیر)
۱/۳۰	% ۱/۲ ± ۱۵/۵	۶۹۹۴	۹۵۹/۲	۳/۵۰	۳۸۴/۷	۲۰۰	۱۹	پاییز (آذر)
۱/۸۷	% ۱/۴ ± ۱۷/۵	۵۴۲۵	۹۷۷/۵	۲/۶۷	۵۱۵/۲	۲۰۰	۲۶	تابستان (شهریور ۲)

پس از محاسبه انرژی حرارتی مفید و انرژی ورودی، بازده حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{useful}}{Q_{in}} \times 100 \quad (3)$$

مقدار انرژی ورودی به سیستم، یعنی تابش مستقیم عمود خورشیدی، با دقت بالا به صورت زیر محاسبه شده است. از آنجایی که در طول آزمایش‌ها، اندازه‌گیری مستقیم این کمیت صورت نگرفته است، از یکی از معتبرترین مدل‌های نظری برای شرایط آسمان صاف (البته با در نظر گرفتن ضریب گذرندگی اتمسفر)، یعنی مدل هاتل استفاده گردید. این مدل امکان تخمین DNI را بر اساس موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، روز سال و ساعت فراهم می‌آورد. در این پیوست، مراحل کامل محاسبات بر اساس معادلات مرجع ارائه شده است.

مقادیر ثابت و پارامترهای ورودی برای مکان مورد آزمایش (شهرستان سیرجان) به شرح زیر در نظر گرفته شد:

- ثابت خورشیدی (G_{sc}): 1367 W/m^2

- عرض جغرافیایی: $29/45$ درجه شمالی

- ارتفاع از سطح دریا: 1730 متر

- تاریخ آزمایش (نمونه تابستان): 15 آگوست (۲۴ مرداد)

اولین گام، محاسبه تابش خورشیدی در خارج از اتمسفر زمین است که به دلیل تغییر فاصله زمین از خورشید در طول سال، مقدار آن ثابت نیست. برای این منظور از رابطه دقیق زیر استفاده می‌شود:

$$B = (n - 1) 360 \quad (4)$$

$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \\ G_{sc} (1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B) \end{cases} \quad (5)$$

که در رابطه فوق n شماره روز سال است. مدل هاتل، ضریب گذرندگی اتمسفر برای تابش مستقیم (τ_b) را بر اساس زاویه سمتی خورشید (θ_z) و پارامترهای جوی محاسبه می‌کند:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right) \quad (6)$$

¹ Direct Normal Irradiance - DNI

² Hottel's Clear-Sky Model

پارامترهای a_0 , a_1 و k خود به ارتفاع از سطح دریا و شرایط اقلیمی وابسته هستند. پارامترهای پایه (a_0^* , a_1^* , k^*) برای یک اتمسفر استاندارد با دید ۲۳ کیلومتر، بر اساس ارتفاع A بر حسب کیلومتر از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad (7)$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \quad (8)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.000857(6 - A)^2 \quad (9)$$

برای تطبیق مدل با شرایط اقلیمی واقعی منطقه، از ضرایب تصحیح (r_k, r_1, r_0) استفاده می‌شود (این ضرایب به ترتیب در مقادیر بدست آمده از معادلات (۷-۹) ضرب شده و مقادیر a_0 , a_1 و k را تولید می‌کنند). برای آزمایش تابستان در سیرجان، اقلیم تابستان عرض‌های میانی^۱ انتخاب گردید: $r_k = 1.02$, $r_1 = 0.99$, $r_0 = 0.97$. برای فصول گذار مانند پاییز، مقادیر این ضرایب از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر تابستان و زمستان به دست آمد. در نهایت، مقدار DNI که با G_b یا G_{cnb} نیز نمایش داده می‌شود از حاصل ضرب تابش خارج از جو در ضریب گذرندگی اتمسفر به دست می‌آید:

$$G_{cnb} = G_{on} \tau_b \quad (10)$$

برای افزایش دقت، این محاسبه در سه نقطه زمانی در طول بازه آزمایش (شروع، وسط و پایان) انجام و سپس از نتایج میانگین‌گیری شد تا مقدار متوسط $G_{b,ave}$ (DNI) برای کل دوره آزمایش به دست آید. با اجرای کد بر اساس روابط فوق برای شرایط آزمایش، مقدار متوسط تابش مستقیم عمود به شرح زیر محاسبه گردید که در جدول ۲ مقادیر آن آورده شده است. این مقادیر به عنوان انرژی ورودی در محاسبات راندمان حرارتی سامانه مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲: مقادیر تابش عمودی تخمین زده شده

میزان تابش عمودی متوسط (DNI) [W/m ²]	ساعت پایان	ساعت انجام آزمایش	فصل مورد آزمایش
۹۵۶/۳	۱۵:۴۰	۱۰:۳۰	تابستان (شهریور ماه)
۹۸۱/۲	۱۴:۰۰	۱۱:۰۰	پاییز (آبان ماه)
۹۸۷/۲	۱۴:۱۵	۱۱:۳۰	پاییز (مهر ماه)
۹۷۶/۵	۱۴:۰۰	۱۲:۳۰	تابستان (مرداد ماه)
۹۷۰/۱	۱۴:۰۰	۱۲:۱۵	تابستان (تیر ماه)
۹۵۹/۲	۱۵:۱۵	۱۱:۴۵	پاییز (آذر ماه)
۹۷۷/۵	۱۴:۴۰	۱۲:۰۰	تابستان (شهریور ماه)

قبل از اینکه به تحلیل نتایج جدول ۱ پرداخته شود، مقایسه ای با نتایج کارهای قبلی صورت بپذیرد. از اینرو در جدول ۳ نتایج کار حاضر با نتایج مراجع [۱۶ و ۱۷] مقایسه شده است.

جدول ۳: مقایسه نتایج کار حاضر با کارهای قبل

شار متوسط تقطیر روزانه (L/m ² /day)	میانگین راندمان حرارتی (η_{th})	نوع سیستم و نوآوری	مرجع
۱/۸۵	۱۹/۶٪	دیش ماهواره بازبافتی با آینه‌های موزائیکی (بسیار کم‌هزینه)	این پژوهش
۲-۱/۵	۲۲٪~	اجاق سهموی برای کمپ پناهندگان با بازتابنده نوار مایلار	[۱۷]
۲/۵-۲	۳۰-۲۵٪~	اجاق سهموی با ذخیره‌ساز حرارتی (هزینه متوسط)	[۱۶]

^۱ Midlatitude summer

راندمان و شار تولیدی سیستم حاضر در مقایسه با مقادیر گزارش شده در مطالعات مشابه در محدوده پایین تری قرار دارد. با وجود آن که بازدهی حرارتی سامانه به دلیل موزائیکی بودن بازتابنده‌ها اندکی کمتر از نمونه‌های یکپارچه و ایده‌آل گزارش شده در مطالعات پیشین است، مزیت اصلی طرح در کاهش چشمگیر هزینه ساخت، سادگی فرایند تولید و امکان بهره‌گیری از مصالح بازیافتی و بومی نهفته است. این رویکرد موجب شده است که نسبت هزینه به کارایی سامانه به‌طور محسوسی بهبود یابد و دستگاه بتواند فرآیند تصفیه و شیرین‌سازی آب آلوده یا شور را با هزینه‌ای بسیار کمتر از طرح‌های مشابه انجام دهد. چنین ویژگی‌هایی، سامانه‌ی پیشنهادی را به گزینه‌ای عملی، پایدار و قابل پیاده‌سازی در مناطق کم‌برخوردار و فاقد زیرساخت صنعتی بدل می‌سازد.

نتایج کار حاضر و بررسی آن نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط و دمای اولیه آب، زمان رسیدن به نقطه جوش کاهش می‌یابد. در آبان (با دمای محیط ۹ درجه)، زمان رسیدن به جوش مشابه تابستان (۲۰ دقیقه) است، که نشان می‌دهد احتمالاً شدت تابش مناسبی وجود داشته، اما میزان تقطیر به دلیل اتلاف گرما کمتر بوده است. بیشترین زمان برای رسیدن به جوش در آذر (۲۴ دقیقه) ثبت شده که دمای نسبی پایین‌تر و احتمال کاهش تابش خورشیدی را تأیید می‌کند.

در آزمایش‌های انجام شده طی ماه‌های تابستان، دمای محیط در بازه‌ای بین ۲۷ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد و دمای اولیه آب نیز در سطح نسبتاً بالایی قرار داشته است. تحت این شرایط حرارتی، سامانه‌ی تقطیر خورشیدی عملکردی مطلوب از خود نشان داده است؛ به گونه‌ای که نرخ تصفیه آب بین ۷۵ تا ۱۳۳ سی‌سی در ساعت متغیر بوده و زمان لازم برای رسیدن به نقطه جوش تنها ۱۸ تا ۲۰ دقیقه ثبت شده است. این نتایج حاکی از آن است که در شرایط تابستانی با تابش شدید خورشیدی و دمای محیط بالا، راندمان حرارتی دستگاه به میزان قابل توجهی افزایش یافته و فرآیند تبخیر و تقطیر با کارایی بیشتری انجام می‌شود. این امر نقش مؤثر تابش خورشیدی و دمای اولیه‌ی مطلوب در بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های خورشیدی حرارتی را تأیید می‌کند.

طراحی هندسی اجاق خورشیدی باید بر مبنای بهینه‌سازی زاویه تابش در منطقه مورد استفاده انجام شود. در نیم‌کره شمالی، بهترین زاویه نصب برای بیشترین جذب تابش، معادل عرض جغرافیایی محل ± 15 درجه توصیه می‌شود (کمتر در تابستان، بیشتر در زمستان). همچنین استفاده از بازتاب‌دهنده‌های سهموی یا صفحه‌ای با تمرکز پرتوهای خورشیدی به نقطه مشخص (نقطه کانونی) باعث افزایش شدت انرژی در محل تبخیر آب می‌شود.

شدت تابش خورشیدی تأثیر مستقیمی بر دمای تولیدی در اجاق خورشیدی دارد. با افزایش شدت تابش، سرعت افزایش دما در آب بیشتر شده و زمان رسیدن به نقطه جوش کاهش می‌یابد. به علاوه، در شرایط تابش شدید، کل انرژی جذب شده بیشتر بوده و لذا حجم آب تبخیر شده و در نتیجه تقطیر شده نیز افزایش می‌یابد. این موضوع در داده‌های تجربی ثبت شده در آزمایش‌های صورت گرفته نیز به خوبی مشهود است.

در مجموعه آزمایش‌های انجام شده، عملکرد اجاق خورشیدی در ماه‌های مختلف سال مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای کلیدی شامل دمای محیط، دمای اولیه آب، زمان رسیدن به نقطه جوش، و حجم آب تقطیر شده ثبت شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها، حجم اولیه آب برابر با ۵۰۰ سی‌سی در نظر گرفته شده تا اثر سایر متغیرها با دقت بیشتری بررسی شود.

در ماه‌های تابستانی (تیر، مرداد، شهریور)، دمای محیط و دمای اولیه آب بین ۲۶ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. در این بازه‌ها، زمان رسیدن به نقطه جوش بین ۱۸ تا ۲۰ دقیقه بوده و حجم آب تقطیر شده ۲۰۰ سی‌سی ثبت شده است. این مقادیر نشان‌دهنده بازده بالا و عملکرد مطلوب اجاق خورشیدی در فصل تابستان است. علت اصلی این امر، شدت بالای تابش خورشیدی در تابستان و زاویه تابش نزدیک به عمود در حوالی ظهر است.

در مقابل، در فصل پاییز (مهر، آبان، آذر) که دمای محیط به ۹ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و شدت تابش خورشیدی نیز کمتر شده، زمان رسیدن به نقطه جوش افزایش یافته (تا ۲۴ دقیقه) و حجم آب تقطیر شده نیز کاهش یافته (۱۵۰ سی‌سی). کاهش دما در این ماه‌ها باعث افزایش اتلاف گرمایی شده و بخشی از انرژی جذب شده صرف جبران اختلاف دمای بیشتر بین آب و محیط می‌گردد. این داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که دمای محیط به‌عنوان تابعی از شدت تابش خورشیدی، بر عملکرد سیستم تأثیرگذار است. با وجود اینکه حجم آب اولیه در همه موارد یکسان بوده، تنها تغییر در پارامترهای دمایی و تابشی، منجر به تفاوت در زمان جوش و میزان تقطیر شده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی در کنار تحلیل‌های نظری مبتنی بر زاویه تابش و شدت انرژی خورشیدی، نشان می‌دهد که اجاق‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی گرم و پرتابش (نظیر تابستان‌های ایران) عملکرد بهینه‌تری دارند. بهینه‌سازی زاویه تابش با تنظیم

دقیق جهت اجاق خورشیدی نیز می‌تواند تأثیر چشمگیری در افزایش بازده سیستم داشته باشد. همچنین با در نظر گرفتن داده‌های شدت تابش و رفتار دمایی محیط، استفاده از اجاق خورشیدی در نیمه گرم سال نه تنها اقتصادی‌تر، بلکه از نظر فنی نیز بسیار مؤثرتر است.

از این رو، به‌کارگیری اجاق‌های خورشیدی به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی ایران با تابش بالا می‌تواند یکی از راهکارهای مؤثر در تأمین انرژی پاک و تولید آب آشامیدنی در مناطق کم‌آب باشد.

لازم به ذکر است که شمارش کلیفرم‌ها در نمونه اولیه برابر با $100 \text{ CFU}/100 \text{ ml}$ بود که بیانگر آلودگی شدید آب می‌باشد. پس از گذراندن فرایند گندزدایی خورشیدی، شمارش کلیفرم‌ها به صفر رسید و نتیجه به‌صورت "منفی" گزارش شد. این کاهش قابل توجه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سیستم خورشیدی در حذف باکتری‌های شاخص آلودگی می‌باشد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه دستگاهی و سیالات شرکت گل‌گهر انجام شده است.

در کنار مزیت سادگی، کم هزینه بودن، و راه اندازی و عملیاتی شدن سریع دستگاه، عیب اصلی و عمده آن کند بودن دستگاه است که این مورد تقریباً در تمام سیستم‌های خورشیدی-تقطیری وجود دارد [۱۴]. البته کندی و بازده پایین ذاتی سیستم‌های تقطیر خورشیدی منفرد محدودیتی جدی به‌شمار می‌آید؛ اما همانند بسیاری از فناوری‌های خورشیدی دیگر، این ضعف را می‌توان با چندواحدی کردن، شبکه‌سازی و آرایش موازی تا حد زیادی برطرف نمود.

لازم به تأکید است که در این پژوهش با هدف بهینه‌سازی اقتصادی فرآیند ساخت، از مواد بازیافتی نظیر دیش‌های ماهواره‌ای مستعمل و آهن‌آلات بازمانده جهت طراحی شاسی و المان‌های رابط بهره گرفته شده است؛ بنابراین، کارایی نسبتاً محدود دستگاه در قیاس با هزینه تمام‌شده آن، از منظر هزینه-فایده و توجیه‌پذیری اقتصادی قابل پذیرش تلقی می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه تقطیر خورشیدی با رویکردی نوآورانه مبتنی بر هزینه بسیار پایین و استفاده از مواد بومی و بازیافتی، ساخته و به صورت آزمایشگاهی در شرایط واقعی ارزیابی شد. هدف اصلی، امکان‌سنجی عملی این رویکرد برای تولید آب آشامیدنی سالم بود. یافته‌های کلیدی این مطالعه به شرح زیر است:

۱. اثبات عملکرد حرارتی و اقتصادی: نتایج عملکرد، کارایی قابل توجه سیستم را در شرایط بهینه تابستان نشان داد و به راندمان حرارتی کلی ۱۹٫۶٪ دست یافت. این راندمان، با توجه به فلسفه طراحی مبتنی بر هزینه سرمایه‌گذاری نزدیک به صفر (استفاده از قطعات موجود و بازیافتی)، کاملاً قابل قبول بوده و کارایی اقتصادی بالای این رویکرد را اثبات می‌کند. همچنین، نتایج نشان داد که عملکرد سیستم به شدت به شرایط متغیر محیطی، به ویژه شدت تابش و بازه زمانی آزمایش، وابسته است.

۲. تأیید کارایی گندزدایی: از منظر بهداشتی، سامانه توانایی فوق‌العاده‌ای در حذف کامل آلودگی میکروبی از خود نشان داد. آزمایش‌های میکروبیولوژی که مطابق با استانداردهای APHA انجام شد، تأیید کرد که شمارش کلیفرم‌های کل از $100 \text{ CFU}/100 \text{ ml}$ در آب ورودی، به صفر در محصول نهایی کاهش یافته است، که اثبات‌کننده توانایی کامل آن در تولید آب آشامیدنی سالم از نظر میکروبی است.

محدودیت‌های اصلی و مسیر آینده:

این پژوهش به عنوان یک مطالعه امکان‌سنجی اولیه، دارای محدودیت‌هایی بود که مسیر تحقیقات آینده را روشن می‌سازد. مهم‌ترین محدودیت‌ها شامل عدم ثبت پیوسته داده‌های هواشناسی و عملکردی، عدم تکرار آماری آزمایش‌ها و عدم انجام تحلیل جامع شیمیایی بر روی آب محصول بود. بر این اساس، برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد که با استفاده از ابزارهای ثبت داده خودکار، آزمون‌های دوام بلندمدت برای ارزیابی افت عملکرد ناشی از رسوب و آلودگی انجام شود و تحلیل شیمیایی کاملی برای اعتبارسنجی نهایی کیفیت آب صورت پذیرد. همچنین، توسعه یک مدل نظری می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و افزایش بازده این سامانه‌ها کمک شایانی نماید.

علائم انگلیسی

ثوابت معادله گذرندگی تابش	a_0, a_1
ارتفاع از سطح دریا (km)	A
ثابت مرتبط با روز در مدل هاتل	B
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت j/kg	C_p
قطر متمرکز کننده، m	d
فاصله کانونی m	f
مقدار تابش متوسط W/m^2	$G_{b\text{ave}}$
تابش خورشید مستقیم نرمال در سطح زمین	G_{cnb}
عمق دیش m	h
گرمای نهان kJ/kg	h_{iv}
ثابت معادله گذرندگی تابش	k
جرم	m
شمارنده روز در سال	n
مقدار حرارت ورودی KJ	Q_{in}
مقدار حرارت مفید KJ	Q_{useful}
علائم یونانی	
بازده	η_{th}
ضریب گذرندگی اتمسفر برای تابش مستقیم	τ_b
زاویه سمت الرأس خورشید	θ_z
زیرنویس	
اولیه	ini
تقطیر شده	$dist$
بالانویس	
شرایط مرجع	*

۵-منابع

1. World Bank, Two Billion People Still Lack Access to Safely Managed Water. World Bank Blogs – World Water Day, 2018.
2. UNESCO, UN World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO, 2023.
3. Wada, Y., & Bierkens, M. F. P., Sustainability of Global Water Use: Past Reconstruction and Future Projections. Environmental Research Letters, 2014, 9(10), p. 104003. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/104003

4. FAO, AQUASTAT Global Water Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
5. Statistics Canada, Municipal Water Use. Government of Canada, 2017.
6. Lentswe, K. A., Mawire, A., Owusu, P., & Shobo, A. B., A Review of Parabolic Solar Cookers with Thermal Energy Storage. *Heliyon*, 2021, 7(10), p. e08226. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08226
7. Baylon, J. S., Pérez González, M., García Morán, Y., Tintos Gómez, A., & González López, J. M., Design and Evaluation of a Solar Cooker with Reused Evacuated Tube: Enhancing Thermal Efficiency for Food Cooking. *South Florida Journal of Development*, 2024, 5(12), p. 5651–5663. DOI: 10.46932/sfjdv5n12-055
8. Arunachala, U. C., & Kundapur, A., Cost-Effective Solar Cookers: A Global Review. *Solar Energy*, 2020, 207, p. 903–916. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.026
9. Sharon, H., & Reddy, K. S., A Review of Solar Energy Driven Desalination Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41, p. 1080–1118. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.058
10. WWAP, The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. UNESCO, 2019.
11. Wahab, A., Javid, W., Ahmed, H., Sheikh, A., Shahbaz, M., & Iqbal, S., Enhancing Fresh Water Production in Solar Parabolic Dish Desalination System. *Materials Proceedings*, 2024, 17(1), p. 22. DOI: 10.3390/mp17010022
12. Hendy, Z., Mostafa, M. M., Elnono, M. A., Lasheen, A., & Abdel-Rehim, Z. S., Solar Desalination System Using Parabolic Collector. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 30(4), p. 1117–1134.
13. Abd Elbar, A. R., Baz, F. B., Marzouk, S. A., Eldesoukey, A., & Salem, A. M., Analyzing Solar Still Performance with PV Electricity Storage: Energy, Exergy, Exergoeconomic, and Enviroeconomic Perspectives. *Desalination*, 2025, 597, p. 118400. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118400
14. Ahmed, S. M. M., Al Amin, M. R., Ahammed, S., Ahmed, F., Saleque, A. M., & Rahman, M. A., Design, Construction and Testing of Parabolic Solar Cooker for Rural Households and Refugee Camp. *Solar Energy*, 2020, 205, p. 230–240. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.007
15. Essa, F. A., Abdullah, A., Majdi, H. S., Basem, A., Dhahad, H. A., Omara, Z. M., Mohammed, S. A., Alawee, W. H., Ezzi, A. A., & Yusaf, T., Parameters Affecting the Efficiency of Solar Stills—Recent Review. *Sustainability*, 2022, 14(17), p. 10668. DOI: 10.3390/su141710668
16. Chamsa-Ard, W., Solar Thermal Energy Stills for Desalination: A Review of Technologies. *Journal of Environmental Protection and Technology*, 2020. DOI: 10.21926/jept.2004018
17. Mawire, A., Simelane, S. M., & Abedigamba, P. O., Energetic and Exergetic Performance Comparison of Three Solar Cookers for Developing Countries. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23, p. 14528–14555. DOI: 10.1007/s10668-021-01255-w