

مطالعه آزمایشگاهی اثر ردیابی خورشید بر عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ

محمد حسین زاده

پژوهشگر، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران، mohammad.hz90@yahoo.com

سید مهدی میرزابابایی*

استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران، m.mirzababae@rifst.ac.ir

حسین زمانی

استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران، h.zamani@rifst.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، اثر ردیابی خورشید بر عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور، ردیابی خورشید در طول آزمایش در گام‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای و به صورت دستی صورت گرفته است. همچنین در آزمایشی دیگر، اجاق خورشیدی تحت زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق و رو به جنوب قرار داده شده است. در این پژوهش، اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ برای به جوش آوردن آب استفاده شده است. همچنین، مقایسه عملکرد اجاق خورشیدی در دو وضعیت ثابت و متحرک از دو دیدگاه انرژی و انرژی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت برای اجاق خورشیدی ۲ ساعت و ۲۵ دقیقه است؛ این در حالی است که ردیابی خورشید توسط اجاق خورشیدی این زمان را به مدت ۱ ساعت و ۵ دقیقه (۴۴/۸۳ درصد) کاهش می‌دهد. همچنین، بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با ردیابی خورشید به ترتیب حدود ۴/۹۲ درصد و ۰/۵۷ درصد زیاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اجاق خورشیدی، لوله تحت خلأ، ردیابی خورشید، تحلیل انرژی، تحلیل انرژی.

Experimental Study of the Effect of Sun Tracking on the Performance of an Evacuated Tube Solar Cooker

M. Hosseinzadeh

Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

S. M. Mirzababae

Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

H. Zamani

Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, the effect of sun tracking on the performance of an evacuated tube solar cooker is experimentally investigated. For this purpose, sun tracking is manually performed in time intervals of 5 min. Moreover, in another experiment, the solar cooker is placed towards the south with a tilt angle of 30°. In this research, the evacuated tube solar cooker is utilized to boil water. In addition, the comparison of the performance of the solar cooker in the fixed and movable situations is conducted from the energy and exergy viewpoints. The results indicate that the time required to boil 800 gr of water in the experiment in which the solar cooker is in the fixed situation is 2 h and 25 min. However, the sun tracking by the solar cooker reduces the mentioned time by about 1 h and 5 min (44.83%). Using sun tracking, the energy and exergy efficiencies of the solar cooker also increase about 4.92% and 0.57% in order.

Keywords: Solar cooker, Evacuated tube, Sun tracking, Energy analysis, Exergy analysis.

۱- مقدمه

توجه آمارهای وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا، تولید انرژی الکتریکی با انتشار گاز بیشتری نسبت به سوزاندن گاز مایع همراه است [۴]. از این رو، استفاده از اجاق‌های خورشیدی به عنوان یکی از روش‌های پخت مواد غذایی به صورت پاک مورد استقبال قرار گرفته است؛ هرچند استفاده از انرژی خورشیدی در فرایند پخت‌وپز زمان پخت مواد غذایی را نسبت به انرژی الکتریکی افزایش می‌دهد که این امر در شرایطی با شدت تابش خورشیدی کم قابل توجه است [۴]. با توجه به نحوه استفاده از انرژی خورشیدی در فرایند پخت، اجاق‌های خورشیدی را می‌توان به دو دسته اجاق‌های خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد [۵]. یکی از انواع اجاق‌های خورشیدی مستقیم نیز اجاق‌های خورشیدی با متمرکزکننده خورشیدی است که تاکنون مطالعات زیادی بر روی آن‌ها صورت گرفته است.

در یک مطالعه تجربی، ارینس [۶] به طراحی و ساخت یک اجاق

یکی از مهم‌ترین نیازهای روزانه جامعه بشری تأمین انرژی موردنیاز به منظور پخت مواد غذایی است. گزارش سازمان ملل متحد نشان می‌دهد، حدود ۳ میلیارد نفر در جهان از چوب، زغال چوب، زغال سنگ یا فضولات حیوانی برای پخت‌وپز و گرمایش استفاده می‌کنند که این امر علاوه بر تخریب جنگل‌ها سبب آلودگی هوا و گرم شدن کره زمین می‌شود [۲،۱]. بنابراین، پخت مواد غذایی با استفاده از انرژی‌های پاک مورد توجه قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که سازمان ملل متحد چشم‌اندازها و اهدافی را در این راستا تا سال ۲۰۳۰ تعیین نموده است [۱]. اگرچه در کشورهای توسعه‌یافته استفاده از انرژی الکتریکی برای تأمین انرژی پخت‌وپز رایج است؛ تنها حدود ۱۳ درصد مردم جهان دسترسی محدودی به انرژی الکتریکی دارند [۳،۱]. همچنین با

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.mirzababae@rifst.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۰۱/۱۰/۲۰

خورشیدی سهموی قابل حمل پرداخت که در آن متمرکز کننده سهموی قابل تا شدن است. بررسی او نشان داد که میانگین توان خروجی و بازده انرژی اجاق خورشیدی ساخته شده به ازای به جوش آوردن ۱/۵ لیتر آب به ترتیب ۱۷۵ وات و ۲۶/۶ درصد است. سانیون و فیلیپ [۷] یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده از نوع فرنسل^۱ خورشیدی را طراحی و مورد آزمایش قرار دادند. اجاق خورشیدی ساخته شده توسط آن‌ها مناسب برای یک خانواده ۴-۵ نفر است. آن‌ها اجاق خورشیدی را در حالت بدون بار و به ازای پخت مواد غذایی مختلف ارزیابی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با استفاده از اجاق خورشیدی موردنظر، ۵ لیتر آب در مدت زمان یک ساعت و ۳۰ دقیقه به دمای ۹۰ درجه سلسیوس می‌رسد. همچنین، ۲۰۰ گرم برنج در مدت ۱ ساعت به کمک اجاق خورشیدی پخته می‌شود. رابو و همکاران [۸] به صورت تجربی عملکرد یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده کیفی شکل را مورد مطالعه قرار دادند. در بستر آزمایشگاهی آن‌ها قابلمه پخت‌وپز در داخل یک محفظه شیشه‌ای به منظور عایق‌سازی قرار گرفته است. با توجه به نتایج آن‌ها، هنگامی که اختلاف بین دمای آب و دمای محیط ۵۰ درجه سلسیوس باشد، توان اجاق خورشیدی حدود ۱۱۰ وات است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که استفاده از درب شیشه‌ای به جای درب فولادی مشکی برای قابلمه پخت‌وپز توان استاندارد اجاق خورشیدی را حدود ۴۶ درصد افزایش می‌دهد.

در یک پژوهش تجربی، بیو و تیکر [۹] به مطالعه یک اجاق خورشیدی سهموی همراه با محفظه پخت ترکیب شده با مواد ذخیره کننده حرارت پرداختند که در آن از متمرکز کننده سهموی به منظور شارژ مواد ذخیره کننده گرما استفاده شده است. مواد ذخیره کننده گرما استفاده شده در مطالعه آن‌ها ماده تغییر فاز دهنده منیزیم کلراید هگزا هیدرات^۲ و روغن تورس ترم^۳ ۵۰۰ است. آن‌ها مشاهده کردند که ماده تغییر فاز دهنده پس از گذشت ۵۰ دقیقه به دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین، ۵۰ گرم برنج همراه با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب در مدت زمان ۳۰ دقیقه پخته می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که بازده انرژی اجاق خورشیدی حدود ۵/۴۱ درصد است. ماسرد و همکاران [۱۰] به صورت تجربی عملکرد یک اجاق خورشیدی سهموی را با یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم مقایسه کردند. اجاق خورشیدی غیرمستقیم از یک گردآور خورشیدی سهموی خطی و واحد پخت داخلی تشکیل شده است. واحد پخت نیز شامل ۸ لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده نمک‌های نیترات سدیم و پتاسیم است که در داخل سیال کاری روغن دوراترم^۴ ۶۳۰ قرار دارند. بررسی آن‌ها نشان داد که مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۱ لیتر آب در اجاق خورشیدی سهموی حدود ۲۷ دقیقه است؛ این در حالی است که پس از شارژ واحد ذخیره کننده گرما، مدت زمان سپری شده برای به جوش آوردن آب در اجاق خورشیدی غیرمستقیم ۳۸ دقیقه است.

در مطالعه تجربی، سروین-کمپوزانو و همکاران [۱۱] اثر استفاده از

رنگ سیاه و دوده برای پوشش دادن قابلمه پخت‌وپز را بر بازده یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده سهموی مرکب بررسی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، ۳/۵ لیتر آب در قابلمه با پوشش دوده طی مدت زمان ۹۰ دقیقه به دمای ۹۰ درجه سلسیوس می‌رسد؛ در حالی که استفاده از پوشش رنگ سیاه برای قابلمه زمان موردنظر را نسبت به پوشش دوده بیش از ۳۰ دقیقه افزایش می‌دهد. همچنین، بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی به ازای پوشش دوده برای قابلمه به ترتیب ۲۶ درصد و ۲/۸ درصد و برای پوشش رنگ سیاه برای قابلمه به ترتیب ۲۱ درصد و ۲/۱ درصد است. شوکلا [۱۲] به صورت تجربی عملکرد دو اجاق خورشیدی سهموی برای کاربردهای خانگی و عمومی را از دو دیدگاه انرژی و انرژی مورد پژوهش قرار داد. او نتیجه گرفت که تغییرات انرژی خروجی برای اجاق خورشیدی استفاده شده در کاربرد عمومی در حدود ۱/۹۲-۲/۵۸ وات و برای اجاق خورشیدی استفاده شده در کاربرد خانگی در حدود ۰/۶۵-۱/۴۵ وات است. در یک پژوهش تجربی، ازتورک [۱۳] بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با متمرکز کننده سهموی خطی و یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای را با یکدیگر مقایسه کرده است. بررسی او نشان داد که میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی سهموی و اجاق خورشیدی جعبه‌ای به ترتیب ۹/۲ درصد و ۱۹ درصد است. همچنین، بازده انرژی اجاق‌های خورشیدی بیان شده به ترتیب ۰/۸۹ درصد و ۲/۱۵ درصد است. السود و همکاران [۱۴] به صورت تجربی عملکرد یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده سهموی خطی همراه با ردیاب خورشیدی را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند، هنگامی که بیشترین دمای محیط ۳۶ درجه سلسیوس است، دمای آب در اجاق خورشیدی به ۹۰ درجه سلسیوس می‌رسد. در یک مطالعه تجربی، ابومالوه و همکاران [۱۵] اثر استفاده از ردیاب خورشیدی را بر عملکرد یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده کروی ارزیابی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، بیشترین دمای داخل قابلمه پخت‌وپز در طول آزمایش برابر ۹۳ درجه سانتی‌گراد است.

یکی از انواع اجاق‌های خورشیدی با متمرکز کننده خورشیدی نیز اجاق‌های خورشیدی با لوله تحت خلأ هستند. شرما و یاداو [۱۶] به صورت تجربی یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ را در حالت بی‌باری و به ازای گرم کردن آب و پختن سیب‌زمینی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ۰/۵ لیتر آب در این اجاق خورشیدی ساخته شده در مدت ۱ ساعت به دمای ۸۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین، ۱ کیلوگرم سیب‌زمینی طی مدت ۱/۵ ساعت توسط این اجاق خورشیدی پخته می‌شود. در یک مطالعه تحلیلی و تجربی، ژائو و همکاران [۱۷] عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ را بررسی کردند که در آن متمرکز کننده خورشیدی از نوع فرنسل خمیده است. آن‌ها اجاق خورشیدی را در حالت بی‌باری و به ازای پخت سیب‌زمینی شیرین، ترب، یم^۵ و گوشت خوک مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که با افزایش تابش خورشیدی از ۴۱۰ وات بر مترمربع به ۹۱۰ وات بر مترمربع، بیشترین دمای هوای داخل لوله تحت خلأ در حالت بی‌باری از مقدار ۲۷۲ درجه سلسیوس به ۴۱۰ درجه سلسیوس می‌رسد. همچنین از میان مواد غذایی نام برده شده، کمترین زمان

¹ Fresnel

² Magnesium chloride hexahydrate

³ Taurus Therm

⁴ Duratherm

⁵ Yam

پخت با رفلکتور به ۳۰ دقیقه کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شده است که پخت و پز عصرگاهی با استفاده از واحد ذخیره‌سازی گرما سریعتر از پخت و پز در روز در بار کم است.

همان‌گونه که بیان گردید، تاکنون محققان زیادی به بررسی انواع اجاق‌های خورشیدی با متمرکز کننده خورشیدی پرداخته‌اند؛ ولی پژوهش‌های صورت گرفته بر روی اجاق‌های خورشیدی با لوله تحت خلأ اندک است. در این مطالعه، اثر ردیابی خورشید بر عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به‌صورت تجربی بررسی شده است که تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه منتشر نشده است. در آزمایش‌های صورت گرفته، اجاق خورشیدی در دو وضعیت ثابت و متحرک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در وضعیت ثابت، اجاق خورشیدی در طول آزمایش رو به جنوب قرار داده شده است؛ این در حالی است که در وضعیت متحرک، ردیابی خورشید در طول آزمایش توسط اجاق خورشیدی و به‌صورت دستی صورت گرفته است. در این پژوهش، مقایسه عملکرد اجاق خورشیدی در دو وضعیت ذکر شده از دو دیدگاه انرژی و انرژی صورت گرفته است. در بررسی‌های صورت گرفته از اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به‌منظور به جوش آوردن آب استفاده شده است.

۲- بستر آزمایشگاهی

در این مطالعه، بستر آزمایشگاهی شامل یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با مخزن فولادی است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. اجاق خورشیدی از دو بخش متمرکز کننده خورشیدی سه‌موی خطی و لوله تحت خلأ تشکیل شده است. متمرکز کننده خورشیدی از جنس آلومینیوم با ضریب انعکاس تابش ۰/۹ است. لوله تحت خلأ در واقع دو لوله هم‌مرکز با قطرهای متفاوت و از جنس شیشه برسلیکات^۲ بوده که طرح آن در شکل ۲ نشان داده شده است. لوله خارجی کاملاً شفاف بوده تا تابش خورشیدی از آن عبور کند؛ در حالی که سطح خارجی لوله داخلی توسط ماده جاذب تابش خورشید پوشانده شده است. بنابراین، فرایند پخت در داخل لوله داخلی صورت می‌گیرد. همچنین، هوای موجود در فضای بین دو لوله تخلیه شده است تا تلفات انتقال حرارت جابجایی از لوله داخلی حداقل شود. به‌منظور نگهداری خلأ موجود در فضای بین دو لوله، قسمت انتهایی لوله با لایه‌ای خالص از فلز باریم^۳ پوشش‌دهی می‌شود. همچنین، لایه باریم یک نمایشگر از وضعیت خلأ در فضای بین دو لوله نیز است؛ در صورتی که خلأ موجود در فضای بین دو لوله از بین برود، لایه نقره‌ای رنگ باریم به رنگ سفید در خواهد آمد. مشخصات هندسی لوله تحت خلأ در مطالعه حسین زاده و همکاران [۱۸] بیان شده است.

پخت متعلق به گوشت خوک بوده که مقدار آن ۳۴ دقیقه است. در این حالت، بازده انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ برابر ۲۲/۶ درصد است. حسین زاده و همکاران [۱۸] به‌صورت تحلیلی اثر پارامترهای مختلف هندسی و محیطی را بر بازده یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ مورد ارزیابی قرار دادند. پارامترهای بررسی شده در مطالعه آن‌ها فشار مطلق هوا در محفظه خلأ بین دو لوله، ضریب نشر حرارت ماده جاذب، ضریب جذب تابش ماده جاذب و تابش خورشیدی است. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش ضریب جذب تابش ماده جاذب از ۰/۷۵ به ۰/۹۵ بازده اجاق خورشیدی به میزان ۱۳/۶۶ درصد زیاد می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش دادند که تابش خورشیدی مؤثرترین پارامتر بر توان اجاق خورشیدی است.

شرما و همکاران [۱۹] عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله خلأ و مواد ذخیره‌ساز اریتریول^۱ را بررسی کردند؛ نتایج آزمایش با بارهای گرمی متفاوت در عصر و شب و در شرایط آب و هوایی می‌زاین نشان داد که پخت و پز ظاهر بر پخت عصر تأثیر نمی‌گذارد، و آشپزی عصرانه با استفاده از حرارت ذخیره شده سریعتر از پختن ظاهر بود.

کامر و همکاران [۲۰] عملکرد یک اجاق خورشیدی با محفظه تحت فشار و لوله خلأ را آزمایش کردند که دارای دو بخش مجزای جذب کننده انرژی و واحد پخت بود که بوسیله یک مبادله‌کن گرمایی به هم متصل شدند. در این مقاله نتایج تجربی و مدل سازی در شرایط مختلف عملکردی سیستم با هم مقایسه شدند که تطابق خوبی داشتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده امکان چندین مرحله پخت خورشیدی در یک روز آفتابی صاف در شرایط معمولی دهلی اثبات شد.

عملکرد حرارتی یک اجاق خورشیدی با دو سیال عامل آب و روغن موتور به همراه مواد تغییر فاز دهنده استانیلید توسط سینق و همکاران [۲۱] به صورت تجربی بررسی شد. در این طرح آزمایشی، اجاق خورشیدی با واحد ذخیره گرمایی داخلی از طریق لوله‌های اتصال به جمع کننده لوله تخلیه شده متصل شدند. گرمای خورشیدی موجود در متمرکز کننده با گردش طبیعی (ترموسیفون) به اجاق خورشیدی منتقل شد. نتیجه بررسی‌ها نشان داد که مقدار متوسط انرژی ذخیره شده توسط مواد ذخیره کننده با استفاده از روغن حرارتی در مقایسه با آب به میزان ۱۸/۸۸ درصد افزایش یافت.

فروغی [۲۲] طرح جدیدی از یک اجاق خورشیدی با لوله خلأ را ارائه کرد. در طرح پیشنهادی، محقق از یک کلکتور خورشیدی با آینه-های باریک شیشه‌ای که در داخل یک قاب چوبی نصب شده بود استفاده کرد. با استفاده از این سیستم دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس که آن برای انواع پخت و پز مناسب است به دست آمد که در مقایسه با سایر اجاق‌های خورشیدی معمولی، قدرت پخت قابل ملاحظه‌ای را تأمین کرد. کامر و همکاران [۲۳] یک اجاق خورشیدی را بر پایه لوله تحت خلأ با واحد ذخیره انرژی استانیلید بررسی کردند. انرژی ذخیره شده در استانیلید در طول روز به طور کامل به ظرف پخت منتقل می‌شود. در این تحقیق فرایند پخت برای بارهای گرمایی مختلف آزمایش شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در بارهای زیاد، اجاق خورشیدی عملکرد بهتری با رفلکتور نسبت به بدون بازتاب دارد طوری که زمان

² Borosilicate

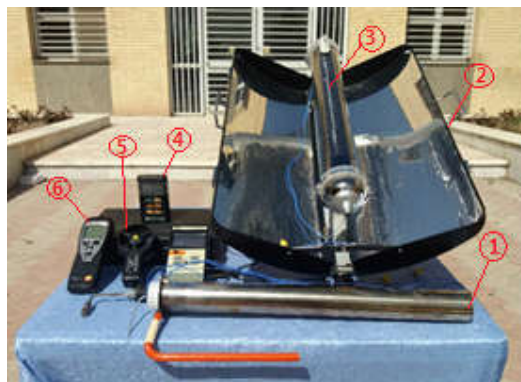
³ Barium

¹ Erythritol

شده در جدول ۱ گزارش شده است.



شکل ۳- نمایی از شاخص نصب شده بر روی لوله تحت خلأ به منظور ردیابی خورشید



شکل ۱- نمایی از بستر آزمایشگاهی، ۱: محفظه پخت، ۲: صفحه متمرکزکننده تابش، ۳: لوله دو جداره تحت خلأ، ۴: تابش سنسج، ۵: بادسنسج، ۶: دماسنج

جدول ۱- دقت و عدم قطعیت ابزار اندازه گیری

ابزار	بخش اندازه گیری	دقت ابزار	عدم قطعیت ابزار
تابش سنسج	تابش خورشیدی	$\pm 10 \text{ W/m}^2$	$\pm 2/89 \text{ W/m}^2$
بادسنسج	سرعت باد	$\pm 2\%$	$\pm 0.3 \text{ m/s}$
دماسنج جیوه‌ای	دمای محیط	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.14 \text{ }^\circ\text{C}$
دماسنج نوع کی	دمای آب و سطح	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.14 \text{ }^\circ\text{C}$

۳- تحلیل ترمودینامیکی

در این پژوهش، تحلیل ترمودینامیکی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ از دو دیدگاه انرژی و انرژری بیان می‌شود. در ابتدا تحلیل انرژی اجاق خورشیدی ذکر شده و در ادامه روابط مربوط به تحلیل انرژری اجاق خورشیدی بیان می‌گردد.

۳-۱- تحلیل انرژی اجاق خورشیدی

انرژی ورودی به اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ تابش خورشیدی است. نرخ انرژی ورودی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

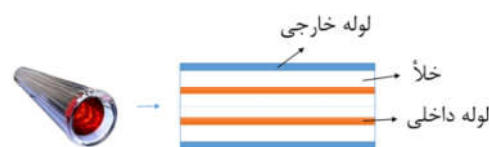
$$\dot{E}_{in} = I_{ave} A_a \quad (1)$$

در رابطه بالا، I_{ave} میانگین نرخ تابش خورشیدی ورودی در یک گام زمانی و A_a نیز مساحت دهانه متمرکز کننده سهموی خطی است. همان‌گونه که بیان شد، در این مطالعه از اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به منظور به جوش آوردن آب استفاده می‌شود. نرخ انرژی گرمایی دریافتی توسط آب نیز توان خروجی اجاق خورشیدی نامیده شده که توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۰]:

$$\dot{E}_{sc} = \frac{m_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i})}{\Delta t} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، m_w به جرم آب و C_w به گرمای ویژه آب اشاره دارد. همچنین Δt نشان‌دهنده گام زمانی است. $T_{w,i}$ و $T_{w,f}$ نیز به ترتیب دمای آب در ابتدا و انتهای گام زمانی هستند. با تعیین نرخ انرژی ورودی به اجاق خورشیدی و توان خروجی اجاق خورشیدی توسط روابط (۱) و (۲)، بازه انرژی اجاق خورشیدی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$\eta_{sc} = \frac{\dot{E}_{sc}}{\dot{E}_{in}} = \frac{m_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i})}{I_{ave} A_a \Delta t} \quad (3)$$

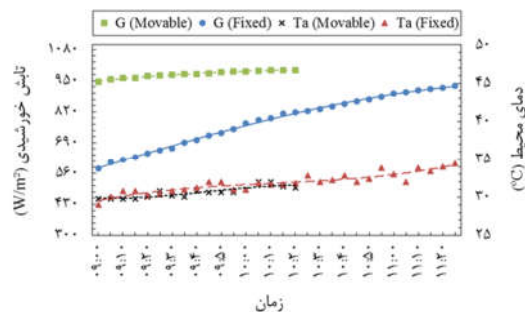


شکل ۲- نمایی از طرح لوله تحت خلأ

در این پژوهش، اجاق خورشیدی برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آزمایش‌های صورت گرفته به منظور جلوگیری از آسیب‌های ناشی از تنش‌های حرارتی به لوله تحت خلأ، آب در داخل یک مخزن با جنس فولاد ضدزنگ (AISI 316) نگهداری می‌شود. بنابراین، مخزن حاوی آب در داخل لوله تحت خلأ قرار می‌گیرد. قطر داخلی و ضخامت مخزن فولادی به ترتیب ۴۸/۶ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر است. همان‌گونه که بیان شد، هدف این مطالعه ارزیابی میزان تأثیر ردیابی خورشید بر عملکرد اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ است. برای این منظور، ردیابی خورشید در طول آزمایش هر ۵ دقیقه و به کمک شاخص قرار داده شده بر روی لوله تحت خلأ به صورت دستی صورت گرفته است. نمایی از این شاخص در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همچنین جهت درک بهتر اثر ردیابی خورشید، در آزمایشی دیگر اجاق خورشیدی تحت زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق و رو به جنوب قرار داده شده است [۱۹]. آزمایش‌ها در روزهای بدون ابر در مردادماه و در مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی (عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه) صورت گرفته است. تصویری از تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در طول آزمایش‌ها، دمای محیط و شدت تابش خورشیدی به ترتیب توسط یک دماسنج جیوه‌ای و یک تابش‌سنسج دیجیتال (TES-1333, Taiwan) ثبت شده است. همچنین، دمای آب و دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ با استفاده از دماسنج‌های از نوع کی^۱ اندازه‌گیری شده است. به منظور ثبت سرعت باد در اطراف اجاق خورشیدی از یک بادسنسج دیجیتال (Lutron AM-4201, Taiwan) استفاده شده است. دقت و عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری استفاده

^۱ K

متحرک، انتهای این آزمایش به ظهر خورشیدی نزدیکتر است. بنابراین، تغییرات دمای محیط در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت نسبت به مقدار متناظر آن در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک بیشتر است.



شکل ۱- تغییرات تابش خورشید و دمای محیط در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

تغییرات دمای آب و دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک برای اجاق خورشیدی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. آزمایش‌ها در ساعت ۹ صبح و در حالی که دمای آب موجود در مخزن فولادی ۲۹ درجه سلسیوس است شروع شده و با رسیدن آب به نقطه جوش خاتمه می‌یابد. از آنجا که با ردیابی خورشید میزان انرژی ورودی به اجاق خورشیدی افزایش می‌یابد؛ تغییرات دمای آب پس از گذشت یک مدت زمان مشخص از آزمایش مربوط به وضعیت متحرک از مقدار متناظر آن در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت بیشتر است. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده است، دمای ۸۰۰ گرم آب در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک پس از گذشت ۴۵ دقیقه از ۲۹ درجه سلسیوس به ۶۶/۱ درجه سلسیوس می‌رسد؛ این در حالی است که افزایش دمای آب در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت در بازه زمانی ذکر شده به میزان ۱۶/۳ درجه سلسیوس است. با توجه به نتایج، مدت زمان لازم برای به جوش آوردن آب در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت ۲ ساعت و ۲۵ دقیقه است که ردیابی خورشید توسط اجاق خورشیدی این زمان را به مدت ۱ ساعت و ۵ دقیقه (۴۴/۸۳ درصد) کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ در طول آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک برای اجاق خورشیدی به ترتیب ۳۹/۶ درجه سلسیوس و ۳۸/۸ درجه سلسیوس است. از این رو، دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ در دو آزمایش اختلاف قابل توجهی با یکدیگر ندارند. همچنین بر اساس شکل ۲، تغییرات دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ در طول آزمایش‌های مربوط به وضعیت ثابت و متحرک اندک است. به‌عنوان نمونه، میزان افزایش دمای سطح در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک برابر ۹ درجه سلسیوس است. بنابراین، دمای آب موجود در مخزن فولادی از دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ به مراتب بیشتر است. در همین راستا، نتایج نشان می‌دهد که اختلاف دمای آب و دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ پس از گذشت ۴۵ دقیقه از آزمایش مربوط به وضعیت متحرک در حدود ۲۶ درجه سلسیوس است.

۳-۲- تحلیل انرژی اجاق خورشیدی

انرژی ورودی به اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ انرژی تابش خورشیدی است. نرخ انرژی ورودی توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۱]:

$$\dot{E}X_{in} = I_{ave} A_a \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb,ave}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb,ave}}{T_s} \right)^4 \right] \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $T_{amb,ave}$ میانگین دمای محیط در گام زمانی است. همچنین T_s به دمای خورشید به‌عنوان یک جسم سیاه اشاره دارد که مقدار آن برابر ۵۸۰۰ کلوین است [۲۲]. نرخ تغییر انرژی آب در گام زمانی نیز انرژی خروجی اجاق خورشیدی نامیده شده که با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲۳]:

$$\dot{E}X_{sc} = \frac{m_w C_w \left[(T_{w,f} - T_{w,i}) - T_{amb,ave} \ln \left(\frac{T_{w,f}}{T_{w,i}} \right) \right]}{\Delta t} \quad (5)$$

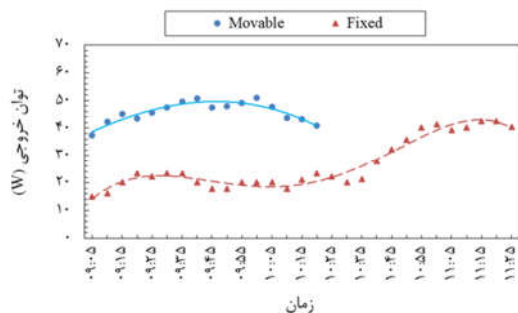
پس از تعیین نرخ انرژی ورودی به اجاق خورشیدی و انرژی خروجی اجاق خورشیدی توسط روابط (۴) و (۵)، بازه انرژی اجاق خورشیدی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_{sc} = \frac{\dot{E}X_{sc}}{\dot{E}X_{in}} = \frac{m_w C_w \left[(T_{w,f} - T_{w,i}) - T_{amb,ave} \ln \left(\frac{T_{w,f}}{T_{w,i}} \right) \right]}{I_{ave} A_a \Delta t \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb,ave}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb,ave}}{T_s} \right)^4 \right]} \quad (6)$$

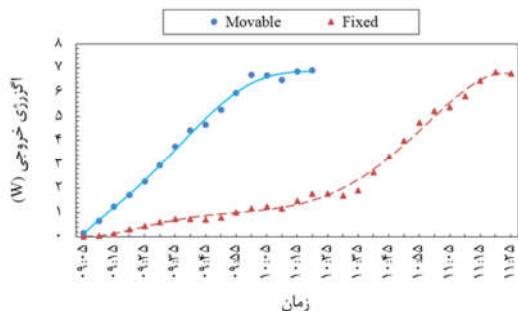
۴- تفسیر نتایج

در این مطالعه، اثر ردیابی خورشید بر عملکرد اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ از دو دیدگاه انرژی و انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، اجاق خورشیدی در دو وضعیت ثابت و متحرک آزمایش شده است. در این بخش، عملکرد اجاق خورشیدی در دو وضعیت ذکر شده با یکدیگر مقایسه شده است. در آزمایش‌های صورت گرفته، اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب استفاده شده است. بنابراین، آزمایش‌ها با رسیدن آب به دمای جوش خاتمه یافته است.

شکل ۱ تغییرات تابش خورشید و دمای محیط را در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک برای اجاق خورشیدی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، میانگین تابش خورشید در طول آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک به ترتیب ۷۸۰/۸ وات بر مترمربع و ۹۷۷/۵ وات بر مترمربع است. بنابراین، ردیابی خورشید میزان تابش ورودی به اجاق خورشیدی را به میزان ۱۹۶/۷ وات بر مترمربع افزایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تغییرات تابش خورشید در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک برای اجاق خورشیدی اندک است. با توجه به داده‌های ثبت شده، میزان افزایش تابش خورشید حدود ۵ وات بر مترمربع است؛ این در حالی است که در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت برای اجاق خورشیدی، این افزایش قابل توجه و برابر ۳۴۸ وات بر مترمربع است. میانگین دمای محیط در آزمایش‌های مربوط به وضعیت ثابت و متحرک به ترتیب ۳۱/۹ درجه سلسیوس و ۳۰/۶ درجه سلسیوس است. با توجه به طولانی‌تر بودن آزمایش مربوط به وضعیت ثابت نسبت به وضعیت



(الف)



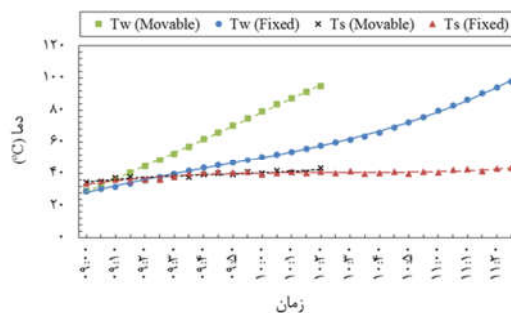
(ب)

شکل ۶- تغییرات (الف) توان خروجی و (ب) آگرزری اجاق خورشیدی در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

جدول ۲- میانگین توان خروجی و آگرزری اجاق خورشیدی در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

وضعیت اجاق خورشیدی		پارامتر
ثابت	متحرک	
۲۶/۵۱	۴۵/۸۰	میانگین توان خروجی اجاق خورشیدی (W/m^2)
۲/۲۸	۴/۱۸	میانگین آگرزری اجاق خورشیدی (W/m^2)

تغییرات بازده انرژی و آگرزری اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک برای اجاق خورشیدی در شکل‌های ۷ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارها، روند تغییرات بازده انرژی و آگرزری اجاق خورشیدی در طول آزمایش‌ها مشابه با تغییرات توان خروجی و آگرزری اجاق خورشیدی است. میزان افزایش بازده انرژی و آگرزری اجاق خورشیدی در طول آزمایش مربوط به وضعیت ثابت به ترتیب ۷/۷۷ درصد و ۲/۹۱ درصد است. نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که میانگین بازده انرژی و آگرزری اجاق خورشیدی در طول آزمایش مربوط به وضعیت متحرک به ترتیب ۱۷/۰۶ درصد و ۱/۶۶ درصد است. بر اساس این جدول، ردیابی خورشید توسط اجاق خورشیدی بازده انرژی و آگرزری اجاق را به ترتیب حدود ۴/۹۲ درصد و ۰/۵۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش نسبی بازده انرژی و آگرزری اجاق خورشیدی به ترتیب ۴۰/۵۳ درصد و ۵۲/۲۹ درصد است. شایان ذکر است، بازده انرژی اجاق خورشیدی در این مطالعه در محدوده بازده انرژی ارائه شده در مطالعه ژائو و همکاران [۱۷] است که در آن بازده



شکل ۷- تغییرات دمای آب و دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

شکل‌های ۶ (الف) و (ب) تغییرات توان خروجی و آگرزری اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک برای اجاق خورشیدی نشان داده است. با توجه به شکل ۶ (الف)، تغییرات توان خروجی اجاق خورشیدی در طول آزمایش مربوط به وضعیت متحرک در مقایسه با مقدار متناظر آن در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت کمتر است. بیشترین تغییرات توان خروجی اجاق خورشیدی در طول آزمایش مربوط به وضعیت ثابت در حدود ۲۷/۶۰ وات است که این میزان در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک برابر ۱۳/۵۸ وات می‌باشد. طبق نتایج گزارش شده در جدول ۲، میانگین توان خروجی اجاق خورشیدی در طول آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک به ترتیب ۲۶/۵۱ وات و ۴۵/۸۰ وات است. بنابراین، ردیابی خورشید توسط اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ میزان توان خروجی اجاق را حدود ۱۹/۲۹ وات (۷۲/۷۶ درصد) افزایش می‌دهد. شکل ۶ (ب) نشان می‌دهد، آگرزری اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در طول آزمایش‌های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک زیاد می‌شود. بر اساس رابطه (۵)، تغییرات آگرزری اجاق خورشیدی وابسته به مقادیر $(T_{w,f} - T_{w,i})$ و $T_{amb,ave} \ln\left(\frac{T_{w,f}}{T_{w,i}}\right)$ در هر گام زمانی است. همچنین پس از گذشت

یک مدت زمان مشخص، میزان افزایش آگرزری اجاق خورشیدی در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک نسبت به مقدار متناظر آن در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت بیشتر است. با توجه به نتایج، آگرزری اجاق خورشیدی در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک پس از گذشت ۴۵ دقیقه از مقدار ۰/۱۴ وات به ۴/۶۷ وات می‌رسد؛ در حالی که افزایش آگرزری اجاق خورشیدی در آزمایش مربوط به وضعیت ثابت در حدود ۰/۷۲ وات است. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که ردیابی خورشید توسط اجاق خورشیدی آگرزری اجاق را به میزان ۱/۸ وات (۷۵/۶۳ درصد) زیاد می‌کند. همچنین در آزمایش مربوط به وضعیت متحرک، توان خروجی اجاق خورشیدی حدود ۱۱ برابر آگرزری اجاق خورشیدی آن است. این امر نشان از کیفیت پایین توان خروجی اجاق خورشیدی دارد.

این بدان معنا است که سامانه کمترین اتلافات حرارتی را دارد. از دیگر نتایج مهم ردیابی، بالا بودن میانگین توان خروجی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در حالت متحرک نسبت به حالت ثابت (۷۲/۷۶ درصد) می باشد که به نوعی دو نتیجه قبلی را نیز تایید می نماید.

با بررسی نتایج از دیدگاه انرژی نیز ملاحظه می شود که انرژی خروجی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در حالت متحرک ۷۵/۶۳ درصد بیشتر از حالت ثابت است که بیانگر استفاده حداکثری از انرژی دریافتی در حالت متحرک نسبت به حالت ثابت می باشد. در نهایت میانگین بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در طول آزمایش مربوط به وضعیت متحرک به ترتیب ۱۷/۰۶ درصد و ۱/۶۶ درصد و افزایش نسبی بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی به ترتیب ۴۰/۵۳ درصد و ۵۲/۲۹ درصد است.

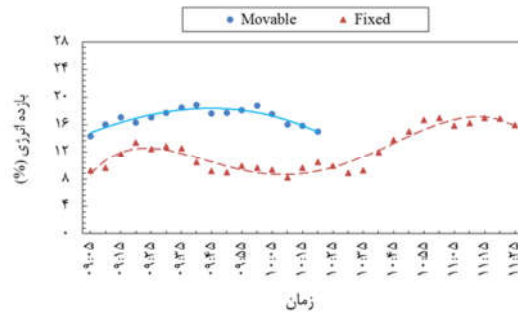
۶- نمادها

A	مساحت در معرض تابش (m^2)
C	گرمای ویژه مخصوص ($J/kg.k$)
E	توان (W)
E_x	شدت انرژی (W)
G	شدت تابش (W/m^2)
h	انتالپی مخصوص (J/kg)
m	جرم (kg)
m	دبی جرمی (kg/s)
T	دما (K)
t	زمان (s)
η	بازده انرژی (%)
ϵ	بازده انرژی (%)
amb	محیط
W	آب
S	خورشید

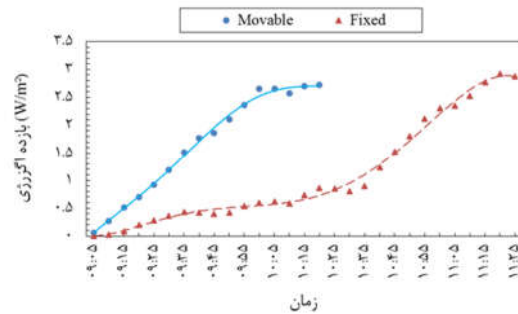
۷- مراجع

- [1] Tawfik M. A., Sagade A. A., Palma-Behnke R., El-Shal H. M. and Abd Allah W. E., Solar cooker with tracking-type bottom reflector: An experimental thermal performance evaluation of a new design. *Solar Energy*, Vol. 220, pp. 295-315, 2021.
- [2] Weldu A., Zhao L., Deng S., Mulugeta N., Zhang Y., Nie X. and Xu W., Performance evaluation on solar box cooker with reflector tracking at optimal angle under Bahir Dar climate. *Solar Energy*, Vol. 180, pp. 664-677, 2019.
- [3] Khan M. M., Iqbal S. Md., Ravi N. T. and Pesala B., Design and development of an optical system for obtaining fixed orientation of concentrated sunlight for indoor applications. *Solar Energy*, Vol. 204, pp. 515-529, 2020.
- [4] Guidara Z., Souissi M., Morgenstern A. and Maalej A., Thermal performance of a solar box cooker with outer reflectors: Numerical study and experimental investigation. *Solar Energy*, Vol. 158, pp. 347-359, 2017.
- [5] Hosseinzadeh M., Sadeghirad R., Zamani H., Kianifar A., Mirzababace S. M. and Faезian A., Experimental study of a nanofluid-based indirect solar cooker: Energy and exergy analyses. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 221, 110879, 2021.

انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به ازای پخت مواد غذایی مختلف بین ۱۱/۲ درصد و ۲۲/۶ درصد است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- تغییرات (الف) بازده انرژی و (ب) بازده انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

جدول ۳- میانگین بازده انرژی و بازده انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش های مربوط به دو وضعیت ثابت و متحرک

وضعیت اجاق خورشیدی		پارامتر
متحرک	ثابت	
۱۷/۰۶	۱۲/۱۴	میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی (%)
۱/۶۶	۱/۰۹	میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی (%)

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در دو وضعیت ثابت و متحرک آزمایش شده است. همچنین، مقایسه عملکرد اجاق خورشیدی در دو وضعیت ذکر شده از دو دیدگاه انرژی و انرژی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان دهنده تأثیر کلیدی تعقیب خورشید بر کاهش زمان پخت و افزایش توان خروجی اجاق خورشیدی بخصوص در ساعات اولیه و پایانی روز می باشد. همچنین آزمایشات نشان داد که زمان جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب در حالت ردیابی ۴۴/۸۳ درصد کمتر از حالت ثابت است و لذا توصیه دارد که برای این نوع از اجاق ها سامانه های ردیابی کم مصرف ساخته و مورد استفاده قرار گیرد. از دیدگاه عملکردی سامانه اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ دارای حداکثر کارایی می باشد به گونه ای که دمای آب موجود در مخزن فولادی از دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ به مراتب بیشتر است و

- [25] Onokwai A. O., Okonkwo U. C., Osueke C. O., Okafor C. E., Olayanju T. M. A. and Dahunsi S. O., Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker. *Renewable energy*, Vol. 142, pp. 497-510, 2019.
- [26] Kumar N., Vishwanath G. and Gupta A., An exergy based test protocol for truncated pyramid type solar box cooker. *Energy*, Vol. 36, No. 9, pp. 5710-5715, 2011.
- [27] Hosseinzadeh M., Sadeghirad R., Zamani H., Kianifar A., Mirzababae S. M., The performance improvement of an indirect solar cooker using multi-walled carbon nanotube-oil nanofluid: An experimental study with thermodynamic analysis. *Renewable Energy*, Vol. 165, pp. 14-24, 2021.
- [28] Öztürk H. H., Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker. *Solar energy*, Vol. 77, No. 1, pp. 67-71, 2004.
- [6] Arenas J. M., Design, development and testing of a portable parabolic solar kitchen. *Renewable energy*, Vol. 32, No. 2, pp. 257-266, 2007.
- [7] Sonune A. V. and Philip S. K., Development of a domestic concentrating cooker. *Renewable energy*, Vol. 28, No. 8, pp. 1225-1234, 2003.
- [8] Ruivo C. R., Carrillo-Andrés A. and Apaolaza-Pagoaga X., Experimental determination of the standardised power of a solar funnel cooker for low sun elevations. *Renewable Energy*, Vol. 170, pp. 364-374, 2021.
- [9] Bhave A. G. and Thakare K. A., Development of a solar thermal storage cum cooking device using salt hydrate. *Solar Energy*, Vol. 171, pp. 784-789, 2018.
- [10] Mussard M., Gueno A. and Nydal O. J., Experimental study of solar cooking using heat storage in comparison with direct heating. *Solar Energy*, Vol. 98, pp. 375-383, 2013.
- [11] Servín-Campuzano H., González-Avilés M., Sobral H., Peña-Gomar M. and López-Miranda A., Soot-based coatings for solar cookers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 138, No. 1, pp. 153-162, 2019.
- [12] Shukla S. K., Comparison of energy and exergy efficiency of community and domestic type parabolic solar cookers. *International Journal of Green Energy*, Vol. 6, No. 5, pp. 437-449, 2009.
- [13] Ozturk H. H., Comparison of energy and exergy efficiency for solar box and parabolic cookers. *Journal of Energy Engineering*, Vol. 133, No. 1, pp. 53-62, 2007.
- [14] Al-Soud M. S., Abdallah E., Akayleh A., Abdallah S. and Hrayshat E. S., A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 463-470, 2010.
- [15] Abu-Malouh R., Abdallah S. and Muslih I. M., Design, construction and operation of spherical solar cooker with automatic sun tracking system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 615-620, 2011.
- [16] Sharma A. and Yadav A., Experimental Study of a Solar Oven based on Evacuated Tube Collector in Indian Climatic Conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1240, 012124, 2019.
- [17] Zhao Y., Zheng H., Sun B., Li C. and Wu Y., Development and performance studies of a novel portable solar cooker using a curved Fresnel lens concentrator. *Solar Energy*, Vol. 174, pp. 263-272, 2018.
- [18] Hosseinzadeh M., Faезian A., Mirzababae S. M. and Zamani H., Parametric analysis and optimization of a portable evacuated tube solar cooker. *Energy*, Vol. 194, 116816, 2020.
- [19] Sharma, S. D., Takeshi Iwata, Hiroaki Kitano, and Kazunobu Sagara. "Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit." *Solar Energy* 78, no. 3: 416-426, 2005
- [20] Kumar, Rakesh, Rajendra Singh Adhikari, H. P. Garg, and Ashvini Kumar. "Thermal performance of a solar pressure cooker based on evacuated tube solar collector." *Applied Thermal Engineering* 21, no. 16 (2001): 1699-1706.
- [21] Singh H, Saini K, Yadav A. Experimental comparison of different heat transfer fluid for thermal performance of a solar cooker based on evacuated tube collector. *Environment, Development and Sustainability*. 2015 Jun;17(3):497-511.
- [22] Farooqui SZ. A vacuum tube based improved solar cooker. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2013 Sep 1;3:33-9.
- [23] Kumar S, Kumar A, Yadav A. Experimental investigation of a solar cooker based on evacuated tube collector with phase change thermal storage unit in Indian climatic conditions. *International Journal of Renewable Energy Technology*. 2018;9(3):310-36.
- [24] Hosseinzadeh M., Sardarabadi M. and Passandideh-Fard M., Energy and exergy analysis of nanofluid based photovoltaic thermal system integrated with phase change material. *Energy*, Vol. 147, pp. 636-647, 2018.