



تحلیل ترمودینامیکی یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ تحت شرایط عملکردی مختلف

محمد حسین‌زاده^۱، سید مهدی میرزابابائی^{۲*} و حسین زمانی^۳

^۱ پژوهشگر، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

^۲ استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

^۳ استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

در این مطالعه، عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با یک مخزن فولادی از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی بررسی شده است. برای این منظور، اجاق خورشیدی ابتدا در حالت بی‌باری آزمایش شده است؛ همچنین، اجاق خورشیدی برای به جوش آوردن آب به ازای شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش دمای سیال، دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ، نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب، نرخ تغییر اگزرژی آب و بازده انرژی و اگزرژی اجاق خورشیدی است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت بی‌باری، دمای هوای داخل مخزن فولادی و دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ پس از گذشت ۱ ساعت به ترتیب حدود ۲۱۴/۲ و ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد؛ همچنین، مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب در شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است. با توجه به نتایج، میانگین بازده انرژی و اگزرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع به ترتیب ۱۶/۱۶ و ۱/۵۷ درصد است. افزایش شدت تابش خورشیدی از ۷۰۰ به ۹۰۰ وات بر مترمربع بازده اگزرژی اجاق خورشیدی را حدود ۰/۷۸ درصد زیاد می‌کند.

کلمات کلیدی: اجاق خورشیدی؛ لوله تحت خلأ؛ تابش خورشیدی؛ تحلیل انرژی؛ تحلیل اگزرژی.

Thermodynamic Analysis of an Evacuated Tube Solar Cooker under Different Operating Conditions

M. Hosseinzadeh¹, S.M. Mirzababae^{2,*}, H. Zamani³

¹ Researcher, Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran.

² Assistant Professor, Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran.

Abstract

In this study, the performance of an evacuated tube solar cooker with a steel tank is investigated from the energy and exergy viewpoints. For this purpose, the solar cooker is initially examined at no-load condition. Moreover, the solar cooker is utilized to boil water at solar radiation intensities of 700 W/m² and 900 W/m². The investigated parameters in this research are fluid temperature, the outer surface temperature of the evacuated tube, the rate of the absorbed thermal energy by water, the rate of the exergy change of water, and the energy and exergy efficiencies of the solar cooker. The results indicate that at no-load condition, the air temperature in the steel tank and the temperature of the outer surface of the evacuated tube increase by 214.2 °C and 15.5 °C after 1 hour, respectively. In addition, the time required to boil 800 gr of water at solar radiation intensity of 900 W/m² is 1 hour and 25 min. Based on the results, the average energy and exergy efficiencies of the evacuated tube solar cooker at solar radiation intensity of 900 W/m² are 16.16% and 1.57%, respectively. Raising the solar radiation intensity from 700 W/m² to 900 W/m² enhances the exergy efficiency of the solar cooker by 0.78%.

Keywords: Solar cooker; Evacuated tube; Solar radiation; Energy analysis; Exergy analysis

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدید پذیر خورشید است. امروزه سیستم‌های خورشیدی مختلف به منظور تأمین انرژی مصرفی روزانه به کار گرفته می‌شوند. یکی از انواع سیستم‌های خورشیدی اجاق‌های خورشیدی هستند که در آن‌ها از انرژی خورشیدی برای پخت مواد غذایی استفاده می‌شود. در کشورهای در حال توسعه، انرژی لازم برای پخت مواد غذایی یکی از مهم‌ترین بخش‌های مصرف انرژی است [۱]؛ بنابراین استفاده از اجاق‌های خورشیدی در این کشورها از محبوبیت بالایی برخوردار است [۲]. یکی دیگر از مزایای استفاده از اجاق‌های خورشیدی کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی است که این امر میزان آسیب‌های وارده به محیط‌زیست و سلامتی انسان را کم می‌کند [۳ و ۴]. اجاق‌های خورشیدی را می‌توان به دو دسته اجاق‌های خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. اجاق‌های خورشیدی مستقیم خود شامل اجاق‌های خورشیدی جعبه‌ای و اجاق‌های خورشیدی با متمرکز کننده هستند [۵]. اجاق‌های خورشیدی غیرمستقیم معمولاً از دو بخش اصلی کلکتور خورشیدی و واحد پخت تشکیل می‌شوند که جذب انرژی خورشیدی توسط کلکتور خورشیدی صورت می‌گیرد [۶]. با توجه به قابلیت بالای لوله‌های تحت خلأ در جذب انرژی خورشیدی و کم بودن تلفات حرارت در آن‌ها، این لوله‌ها در ساختار اجاق‌های خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه انواع مختلف اجاق‌های خورشیدی صورت گرفته است. در یک مقاله مروری، ارونچالا و کونداپور [۸] مطالعات گذشته در زمینه اجاق‌های خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم را جمع‌آوری کرده‌اند. تأکید آن‌ها در این مطالعه روی اجاق‌های خورشیدی تجاری بوده است. آن‌ها همچنین استانداردهای مختلف به منظور آزمایش اجاق‌های خورشیدی را بیان کرده‌اند.

حسین زاده و همکاران [۹] به صورت تجربی به مقایسه اثر استفاده از نانوسیالات دی‌اکسید سیلیسیم-روغن، دی‌اکسید تیتانیوم-روغن و کاربید سیلیسیم-روغن با درصد جرمی ۰/۵ درصد بر بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی غیرمستقیم پرداختند. کلکتور خورشیدی استفاده شده در مطالعه آن‌ها از نوع متمرکز کننده سهموی است.

آن‌ها نتیجه گرفتند که اجاق خورشیدی با نانوسیال کاربرد سیلیسیم-روغن بیشترین بازده انرژی و انرژی را در مقایسه با سایر نانوسیالات بررسی شده دارد که به ترتیب حدود ۴/۲۷ و ۰/۶۱ درصد بیشتر از بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با سیال کاری روغن است. در یک مطالعه تجربی، شرما و همکاران [۱۰] عملکرد یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده اریتریتول^۱ را مورد پژوهش قرار دادند. آن‌ها در بستر آزمایشگاهی خود از دو کلکتور خورشیدی با لوله تحت خلأ استفاده کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که اجاق خورشیدی موردنظر امکان دو نوبت پخت مواد غذایی (در ظهر و عصر) را در یک روز تابستانی فراهم می‌کند؛ همچنین، پخت عصر (که به کمک انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده صورت می‌گیرد) سریع‌تر از پخت ظهر است. فاروکی [۱۱] در یک مطالعه تجربی به ارزیابی اثر میزان سیال کاری آب در لوله تحت خلأ بر عملکرد یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم پرداخت. مقادیر سیال بررسی شده در این پژوهش ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ کیلوگرم است. با توجه به نتایج، اجاق خورشیدی با ۶ کیلوگرم آب در لوله تحت خلأ بیشترین بازده را در مقایسه با سایر مقادیر آب دارد و میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی در طول آزمایش ۲۱/۰۹ درصد است؛ همچنین، بیشترین بازده انرژی اجاق خورشیدی در طول آزمایش ۳/۸ درصد است.

در یک پژوهش تجربی، میلیکیس و همکاران [۱۲] عملکرد یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای همراه با ماده ذخیره کننده گرمای محسوس را مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی از سنگ سیاه و بتن به عنوان مواد ذخیره کننده استفاده شده است. آن‌ها مشاهده کردند که در اجاق خورشیدی موردنظر ۲ کیلوگرم آب در مدت زمان ۳ ساعت به دمای جوش می‌رسد؛ این در حالی است که مدت زمان متناظر در اجاق خورشیدی بدون ماده ذخیره کننده حرارت کمتر از ۲ ساعت است؛ بنابراین، اگرچه استفاده از ماده ذخیره کننده حرارت زمان پخت ظهر را افزایش می‌دهد، ولی از انرژی ذخیره شده می‌توان برای پخت عصر و یا حتی گرم کردن غذا در شب استفاده کرد. ازتورک [۱۳] به صورت تجربی به بررسی بازده یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای از دو

^۱ Erythritol

دیدگاه انرژی و انرژی پرداخت. او نتیجه گرفت که تغییرات بازده انرژی اجاق خورشیدی در طول آزمایش بین ۱/۳ و ۵۵/۶ درصد بوده و تغییرات بازده انرژی اجاق خورشیدی بین ۰/۳ تا ۶ درصد است؛ همچنین، میانگین روزانه بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی به ترتیب ۱۸/۳ و ۲/۲ درصد است.

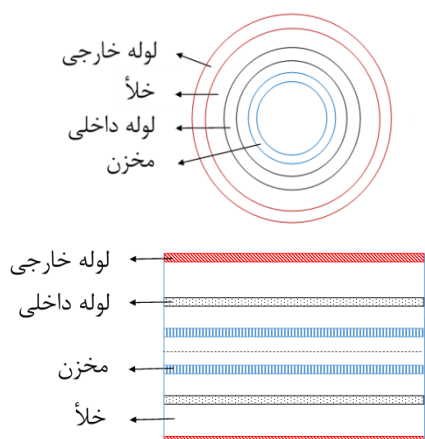
حسین زاده و همکاران [۱۴] در یک پژوهش تجربی اثر سرعت باد را بر بازده انرژی و انرژی یک اجاق خورشیدی متمرکز کننده سهموی ارزیابی کردند. سرعت‌های باد بررسی شده در مطالعه آن‌ها ۰/۲، ۴، ۶ متر بر ثانیه است. بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش سرعت باد از ۰/۲ تا ۶ متر بر ثانیه بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی را به ترتیب ۲۰/۰۸ و ۱/۹۹ درصد کاهش می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که ۲ لیتر آب در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه در مدت زمان ۴۰ دقیقه به دمای جوش می‌رسد. در یک مطالعه تجربی، میکن و همکاران [۱۵] عملکرد یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده سهموی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج آن‌ها، ۵ لیتر آب با استفاده از اجاق خورشیدی موردنظر در مدت زمان ۴۰ دقیقه به نقطه جوش می‌رسد؛ همچنین، توان و بازده اجاق خورشیدی به ترتیب ۶۳۵ وات و ۴۶/۴ درصد است. انوکوی و همکاران [۱۶] به صورت تجربی و آماری به ارزیابی بازده انرژی و انرژی یک اجاق خورشیدی با متمرکز کننده سهموی پرداختند. بررسی آماری آن‌ها توسط طراحی آزمایش‌ها (DOE) و به کمک نرم‌افزار مینی‌تب^۱ صورت گرفته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین بازده انرژی اجاق خورشیدی در ماه ژوئیه ۳۳/۷ درصد است.

در یک پژوهش عددی و آزمایشگاهی، ژائو و همکاران [۱۷] عملکرد یک اجاق خورشیدی همراه با لوله تحت خلأ را مطالعه کردند. در این اجاق خورشیدی از عدسی فرنل^۲ خمیده به عنوان متمرکز کننده خورشیدی استفاده شده است. با توجه به نتایج آن‌ها، میانگین بیشترین دمای سیستم به ازای تابش ۷۱۲ وات بر مترمربع در حالت بدون بار برابر ۳۶۱ درجه سانتی‌گراد است. آن‌ها همچنین در مطالعه خود به بررسی پخت ۰/۵ کیلوگرم از مواد غذایی مختلف شامل

سیب‌زمینی شیرین، یم^۳، ترب و گوشت خوک توسط این اجاق خورشیدی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که گوشت خوک کمترین زمان پخت (۳۴ دقیقه) و ترب بیشترین زمان پخت (۶۴ دقیقه) را نسبت به سایر مواد غذایی مورد بررسی دارد. همچنین بازده انرژی اجاق خورشیدی برای مواد غذایی نام برده شده به ترتیب ۲۲/۶ و ۱۲/۲ درصد است. حسین زاده و همکاران [۱۸] در یک مطالعه تحلیلی اثر پارامترهای محیطی شامل دمای محیط، سرعت باد و تابش خورشیدی را بر عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که تغییرات پارامترهای محیطی اثر اندکی بر بازده اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ دارد. افزایش دمای محیط از ۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد تنها سبب افزایش ۰/۶۵ درصدی بازده اجاق خورشیدی می‌شود. در یک مطالعه دیگر، حسین زاده و همکاران [۱۹] به بهینه‌سازی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ با استفاده از روش تاگوچی^۴ پرداختند. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش شامل فشار مطلق هوا در محفظه خلأ بین دو لوله، ضریب جذب تابش ماده جاذب، ضریب نشر حرارت ماده جاذب و تابش خورشیدی است. آن‌ها نتیجه گرفتند که فشار مطلق هوا در محفظه بین دو لوله مؤثرترین پارامتر بر بازده اجاق خورشیدی است. افزایش فشار مطلق هوا از ۰/۰۱ به ۱۰۰ پاسکال بازده اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ را حدود ۲۳/۰۷ درصد کم می‌کند.

^۳ Yam
^۴ Taguchi

^۱ Minitab
^۲ Fresnel



شکل ۱- دو نما از طرح لوله تحت خلأ همراه با مخزن فولادی

جدول ۱- مشخصات هندسی لوله تحت خلأ و مخزن فولادی [۱۹]

مقدار	مشخصه هندسی
۵۴	قطر داخلی لوله داخلی (mm)
۱/۶	ضخامت لوله داخلی (mm)
۶۶/۴	قطر داخلی لوله خارجی (mm)
۱/۸	ضخامت لوله خارجی (mm)
۶۱	طول لوله (cm)
۴۸/۶	قطر داخلی مخزن (mm)
۱	ضخامت مخزن (mm)
۱	حجم مخزن (L)

انتقال حرارت در اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در مطالعه حسین زاده و همکاران [۱۸] بررسی شده است. در این مطالعه، آزمایش‌ها در تیرماه و در مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی (عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه) انجام شده است. شایان ذکر است، فشار محیط و دمای جوش آب در روزهای انجام آزمایش به ترتیب ۶۶۹ میلی‌متر جیوه و ۹۶/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. در طول آزمایش‌ها، تنظیم شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع روی لوله تحت خلأ از طریق تغییر زاویه اجاق خورشیدی صورت گرفته است. به‌منظور اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از یک تابش‌سنج

بالا، اجاق خورشیدی در حالت بدون بار و به ازای تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، عملکرد اجاق خورشیدی از دو دیدگاه انرژی و انرژی تحلیل شده است که تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تحلیل انرژی اجاق‌های خورشیدی با لوله تحت خلأ صورت نگرفته است.

۲- بستر آزمایشگاهی

بستر آزمایشگاهی شامل یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با یک مخزن با جنس فولاد ضدزنگ (AISI 316) است. اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ یک نوع اجاق خورشیدی مستقیم است که از لوله تحت خلأ و متمرکز کننده خورشیدی آلومینیومی تشکیل شده است. ضریب بازتابش در متمرکز کننده خورشیدی ۰/۹ است؛ همچنین، مساحت دهانه متمرکز کننده خورشیدی حدود ۰/۲۷ مترمربع است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، لوله تحت خلأ در حقیقت دو لوله هم‌مرکز و از جنس شیشه بروسیلیکات^۱ است که لوله بیرونی کاملاً شفاف بوده ولی سطح بیرونی لوله داخلی با مواد جاذب حرارت پوشانده شده است؛ همچنین برای به حداقل رساندن تلفات حرارت در لوله تحت خلأ، هوای موجود در فضای بین دو لوله تخلیه شده است. فرایند پخت مواد غذایی در داخل لوله داخلی صورت می‌گیرد. مشخصات هندسی لوله تحت خلأ و مخزن فولادی در جدول ۱ بیان شده است. در اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ امکان پخت مواد غذایی مختلف و به جوش آوردن آب وجود دارد که در این پژوهش از اجاق خورشیدی به‌منظور به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب استفاده شده است. در آزمایش‌های صورت گرفته برای محافظت لوله تحت خلأ، مخزن حاوی آب در داخل لوله تحت خلأ قرار گرفته است که در شکل ۱ نشان داده شده است. در لوله تحت خلأ، تابش خورشیدی توسط ماده جاذب واقع در سطح بیرونی لوله داخلی جذب می‌شود. فرایند انتقال حرارت از سطح بیرونی لوله داخلی به درون لوله به‌صورت رسانش است. در ادامه، حرارت به‌صورت انتقال حرارت جابجایی آزاد و تابشی به مخزن فولادی منتقل می‌شود. شایان ذکر است، فرایندهای

^۱ Borosilicate



(الف)



(ب)

شکل ۲- نمایی از الف) اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با مخزن فولادی و تجهیزات اندازه‌گیری و (ب) مخزن فولادی

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

در رابطه بالا، m_w و c_w به ترتیب جرم و ظرفیت گرمایی ویژه آب هستند؛ همچنین، $T_{w,i}$ و $T_{w,f}$ به ترتیب نشان‌دهنده دمای آب در ابتدا و انتهای گام زمانی هستند. Δt نیز به گام زمانی اشاره دارد.

با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲)، بازده انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ توسط رابطه زیر قابل تعیین است:

$$\eta = \frac{\dot{E}_w}{\dot{E}_s} \quad (3)$$

۳-۲- تحلیل انرژی

مشابه با تحلیل انرژی، با لحاظ کردن اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به‌عنوان یک سیستم، نرخ انرژی ورودی به

دیجیتال (TES-1333, Taiwan) استفاده شده است که این تابش‌سنج تابش کل را اندازه‌گیری می‌کند. دمای محیط توسط یک دماسنج جیوه‌ای که در نزدیکی اجاق خورشیدی و در سایه نصب شده اندازه‌گیری شده است؛ همچنین، اندازه‌گیری دمای آب و دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ توسط دماسنج‌های از نوع کی^۱ صورت گرفته است. شایان ذکر است، دمای آب در دو نقطه و در فاصله ۶ و ۲۶ سانتی‌متری از کف مخزن اندازه‌گیری شده است که تغییرات دما بین این دو نقطه قابل توجه نیست. سرعت باد در نزدیکی اجاق خورشیدی توسط یک بادسنج دیجیتال (Lutron AM-4201, Taiwan) اندازه‌گیری شده است. شایان ذکر است، ثبت داده‌های آزمایشگاهی هر ۵ دقیقه صورت گرفته است. نمایی از اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با مخزن فولادی و تجهیزات اندازه‌گیری و همچنین نمایی از مخزن فولادی در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است. در شکل ۲-الف، مخزن فولادی داخل لوله تحت خلأ قرار گرفته است.

۳- تحلیل ترمودینامیکی

در این بخش، تحلیل ترمودینامیکی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ از دو دیدگاه انرژی و انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که تحلیل انرژی اجاق خورشیدی کیفیت انرژی را در نظر نمی‌گیرد، تحلیل انرژی به‌منظور تعیین عملکرد واقعی اجاق خورشیدی ضروری است [۲۰].

۳-۱- تحلیل انرژی

با در نظر گرفتن اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به‌عنوان یک سیستم، نرخ انرژی ورودی به سیستم که انرژی خورشیدی است، توسط رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$\dot{E}_s = I_{ave} A_{ap} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، I_{ave} میانگین نرخ تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی در یک گام زمانی است؛ همچنین، A_{ap} مساحت دهانه متمرکز کننده خورشیدی است. نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب در یک گام زمانی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۱]:

^۱ K

جدول ۲- دقت و عدم قطعیت ابزار اندازه گیری

ابزار	بخش اندازه گیری	دقت ابزار	عدم قطعیت ابزار
تابش سنج	تابش خورشیدی	$\pm 10 \text{ W/m}^2$	$\pm 2/89 \text{ W/m}^2$
بادسنج	سرعت باد	$\pm 2\%$	$\pm 0/03 \text{ m/s}$
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	$\pm 0/5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0/14 \text{ }^\circ\text{C}$

۵- تفسیر نتایج

در این پژوهش، عملکرد یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ از دو دیدگاه انرژی و انرژی مطالعه می‌شود. ابتدا اجاق خورشیدی در حالت بی‌باری و به ازای شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع بررسی می‌شود. در ادامه، عملکرد اجاق خورشیدی در دو شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این آزمایش‌ها از اجاق خورشیدی برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب استفاده شده است.

در شکل ۱ تغییرات دمای هوای داخل مخزن فولادی در لوله تحت خلأ، دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ، دمای محیط و تابش خورشیدی در آزمایشی که در آن اجاق خورشیدی در حالت بدون بار است نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در طول آزمایش تابش خورشیدی ورودی تقریباً ثابت و برابر ۹۰۰ وات بر مترمربع است ولی دمای محیط افزایش اندکی (به میزان ۱/۸ درجه سانتی‌گراد) دارد. در طول آزمایش، ثابت نگه داشتن شدت تابش خورشیدی بر روی لوله تحت خلأ از طریق تغییر زاویه اجاق خورشیدی صورت گرفته است. از آنجا که لوله تحت خلأ دارای جذب تابش خورشیدی بالا و تلفات حرارتی کم است [۱۸]، دمای هوای داخل مخزن به سرعت زیاد می‌شود. در این پژوهش، یک مجرا روی درب مخزن برای عبور سیب دماسنج استفاده شده است که این مجرا نیز از افزایش بیش از حد فشار هوا در داخل مخزن جلوگیری می‌کند؛ بنابراین، میزان هوای داخل مخزن در طول آزمایش ثابت نبوده است. با توجه به شکل ۱، میزان افزایش دمای هوا در مدت ۱ ساعت در حدود ۲۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد است؛ همچنین به منظور جلوگیری از آسیب احتمالی به لوله تحت خلأ،

سیستم که انرژی تابش خورشیدی است، توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۲]:

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

در رابطه بالا، $T_{amb,ave}$ میانگین دمای محیط در یک گام زمانی است. همچنین، T_s دمای خورشید به عنوان یک جسم سیاه است که برابر ۵۸۰۰ کلوین در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. نرخ تغییر انرژی آب در یک گام زمانی با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود [۲۴]:

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

با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵)، بازده انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ توسط رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_w}{\dot{E}x_s} \quad (6)$$

۴- تحلیل عدم قطعیت

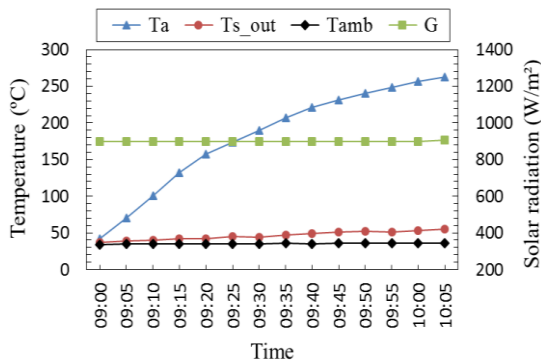
عدم قطعیت هر پارامتر اندازه‌گیری شده مانند v وابسته به عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری و عدم قطعیت ناشی از تکرار آزمایش است که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۳]:

$$\delta v = \sqrt{\delta v_e^2 + \delta v_r^2} \quad (7)$$

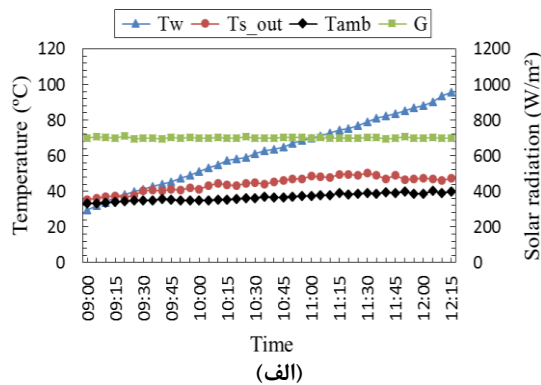
در رابطه (۷)، δv_e و δv_r به ترتیب عدم قطعیت‌های ابزار و تکرار هستند. همچنین برای یک تابع مانند R که خود وابسته به چند پارامتر قابل اندازه‌گیری دیگر شامل $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ است؛ عدم قطعیت توسط رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} \delta v_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n \right)^2} \quad (8)$$

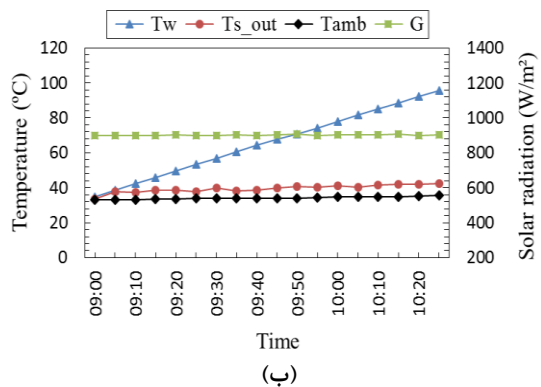
در این مطالعه، دقت و عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری در جدول ۲ بیان شده است؛ همچنین با توجه به نتایج، بیشترین عدم قطعیت بدست آمده حدود ۴ درصد است.



شکل ۱- تغییرات دمای هوای داخل مخزن فولادی در لوله تحت خلأ، دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ، دمای محیط و تابش خورشیدی در حالت بی‌باری



(الف)



(ب)

شکل ۲- تغییرات دمای آب، دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ، دمای محیط و تابش خورشیدی برای شدت تابش خورشیدی (الف) ۷۰۰ و (ب) ۹۰۰ وات بر مترمربع

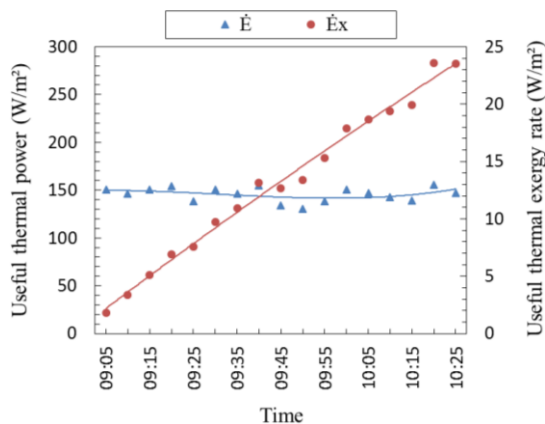
جوش آوردن آب دارد. با توجه به شکل‌های ۲-الف و ۲-ب، تغییرات دمای آب در هر دو آزمایش بیشتر از تغییرات دمای سطح خارجی لوله تحت خلأ است. به‌عنوان نمونه، اختلاف

آزمایش پس از گذشت ۱ ساعت و ۵ دقیقه و رسیدن دمای هوای داخل به ۲۶۲/۵ درجه سانتی‌گراد خاتمه یافته است. تغییرات دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ نشان می‌دهد که علیرغم افزایش بسیار زیاد دمای هوای داخل، دمای سطح بیرونی لوله در مدت ۱ ساعت به میزان ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد بالا رفته است. این امر به دلیل وجود خلأ در فضای بین دو لوله و کم بودن ضریب نشر ماده جاذب است که سبب کاهش میزان تلفات حرارت از لوله تحت خلأ می‌شود. تغییرات دمای هوای داخل و سطح لوله این موضوع را روشن می‌سازد که اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ با وجود امکان ایجاد دمای بسیار زیاد در داخل لوله برای کاربر بدون خطر است که نشان از قابلیت بالای این نوع اجاق دارد.

شکل‌های ۲-الف و ۲-ب تغییرات دمای آب، دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ، دمای محیط و تابش خورشیدی را برای شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع نشان می‌دهند. همان‌گونه که بیان شد، تنظیم شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع بر روی لوله تحت خلأ توسط تغییر زاویه اجاق خورشیدی انجام شده است. با توجه به شکل‌ها، تغییرات شدت تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی در طول دو آزمایش اندک است؛ بنابراین، تنظیم تابش خورشیدی به‌خوبی صورت گرفته است. اگرچه افزایش دمای محیط در طول آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۲/۵ درجه سانتی‌گراد است؛ این میزان افزایش در آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع بیشتر بوده و در حدود ۶/۶ درجه سانتی‌گراد است. دلیل این امر نیز طولانی‌تر بودن مدت زمان آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع و نزدیک شدن به ظهر خورشیدی است. تغییرات دمای آب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان می‌دهد که مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب در شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است. این در حالی است که با کاهش شدت تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی به ۷۰۰ وات بر مترمربع مدت زمان مربوطه به میزان ۱ ساعت و ۵۰ دقیقه افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی اثر قابل توجهی بر زمان مورد نیاز برای به

جدول ۳- میانگین نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب در طول آزمایش‌های با شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع

پارامتر	شدت تابش خورشیدی (W/m ²)	
	۷۰۰	۹۰۰
میانگین نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب (W/m ²)	۶۸/۸۷	۱۴۵/۵۹
میانگین نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب (W/m ²)	۵/۱۵	۱۳/۱۲



شکل ۳- تغییرات نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب در طول آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع

وات بر مترمربع به ترتیب ۵/۱۵ و ۱۳/۱۲ وات بر مترمربع است. بنابراین، نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در طول آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع حدود ۷/۹۷ وات بر مترمربع زیاد می‌شود. تغییرات بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با لوله رابطه‌های (۳) و (۶)، تغییرات بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی در طول آزمایش به ترتیب مشابه با تغییرات نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق هستند؛ بنابراین همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بازده انرژی اجاق خورشیدی در طول آزمایش به میزان ۲/۶۰ درصد افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ در آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع به ترتیب ۱۶/۱۶ و

دمای آب و دمای سطح لوله پس از گذشت ۱ ساعت از آزمایش‌های مربوط به شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع به ترتیب ۱۰/۳ و ۳۶/۸ درجه سانتی‌گراد است؛ همچنین، میزان افزایش دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ پس از گذشت ۱ ساعت از آزمایش‌های بیان شده به ترتیب ۵/۸ و ۷/۴ درجه سانتی‌گراد است. شایان ذکر است، نتایج تحلیلی حسین زاده و همکاران [۱۸] نشان می‌دهد که تغییر شرایط محیطی بر دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ اثر قابل‌توجهی دارد؛ بنابراین، نوسانات اندک دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ در شکل ۲-الف می‌تواند ناشی از این امر و عدم قطعیت آزمایش‌ها باشد.

شکل ۳ تغییرات نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب را در طول آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع نشان می‌دهد. در این شکل، نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق در هر گام زمانی در انتهای آن گام زمانی نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب نشان داده شده در ساعت ۱۰ برابر ۱۷/۸۸ وات بر مترمربع است. این عدد در حقیقت نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب بین ساعت‌های ۹:۵۵ تا ۱۰ است. در این مطالعه، مقادیر نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب به ازای واحد سطح دهانه متمرکز کننده خورشیدی گزارش شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب در طول آزمایش تغییرات زیادی نداشته و تا انتها اندکی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج جدول ۳، میانگین نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب در طول آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۱۴۵/۵۹ وات بر مترمربع بوده که ۷۶/۷۲ وات بر مترمربع بیشتر از مقدار متناظر آن در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع است. با استفاده از رابطه (۵)، نرخ تغییر انرژی اجاق وابسته به مقادیر $(T_{w,f} - T_{w,i})$ و $T_{amb,ave} \ln\left(\frac{T_{w,f}}{T_{w,i}}\right)$ است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نرخ تغییر انرژی اجاق در طول آزمایش افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که از مقدار ۱/۷۹ وات بر مترمربع در ابتدای آزمایش به مقدار ۲۳/۵۲ وات بر مترمربع در انتهای آزمایش می‌رسد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که میانگین نرخ تغییر انرژی اجاق خورشیدی آب در آزمایش‌های مربوط به شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰

مترمربع ارزیابی شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان می‌شوند:

- در حالت بی‌باری، افزایش دمای هوای داخل مخزن فولادی پس از گذشت ۱ ساعت حدود ۲۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد است. این در حالی است که دمای سطح بیرونی لوله تحت خلأ در این مدت تنها به میزان ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد بالا رفته است.

- میزان تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی اثر قابل‌توجهی بر زمان موردنیاز برای به جوش آوردن آب دارد؛ به‌گونه‌ای که مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب در شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است و این مدت زمان با کاهش شدت تابش خورشیدی ورودی به ۷۰۰ وات بر مترمربع به میزان ۱ ساعت و ۵۰ دقیقه افزایش می‌یابد.

- با افزایش شدت تابش خورشیدی از ۷۰۰ به ۹۰۰ وات بر مترمربع، میانگین نرخ انرژی حرارتی دریافتی توسط آب و نرخ تغییر انرژی آب به ترتیب حدود ۷۶/۷۲ و ۷/۹۷ وات بر مترمربع زیاد می‌شود؛ همچنین، بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع حدود ۶/۳۳ و ۰/۷۸ درصد بیشتر از مقادیر متناظر آن در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع است.

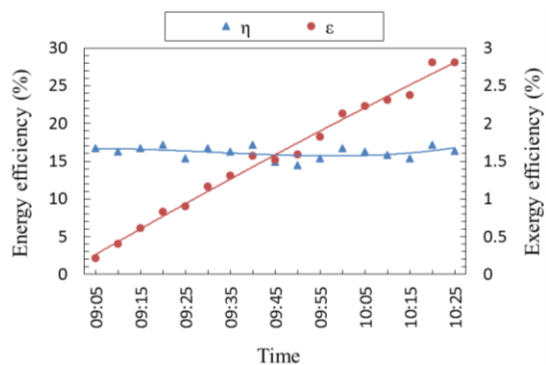
- در آزمایش مربوط به شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع، بازده انرژی اجاق خورشیدی بیش از ۱۰ برابر بازده انرژی آن است که این امر نشان‌دهنده کیفیت پایین توان حرارتی خروجی اجاق خورشیدی است.

۷- مراجع

- [1] Anilkumar BC, Maniyeri R, Anish S (2020) Design, fabrication and performance assessment of a solar cooker with optimum composition of heat storage materials. Environ Sci Pollut Res 1-9.
- [2] Chaudhary R, Yadav A (2020) Experimental investigation of solar cooking system based on evacuated tube solar collector for the preparation of

جدول ۴- میانگین بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی لوله تحت خلأ در طول آزمایش‌های با شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر مترمربع

پارامتر	شدت تابش خورشیدی (W/m^2)	
	۷۰۰	۹۰۰
میانگین بازده انرژی (%)	۹/۸۳	۱۶/۱۶
میانگین بازده انرژی (%)	۰/۷۹	۱/۵۷



شکل ۴- تغییرات بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی لوله تحت خلأ در طول آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع

۱/۵۷ درصد است؛ بنابراین، بازده انرژی اجاق خورشیدی بیش از ۱۰ برابر بازده انرژی آن است که این امر نشان‌دهنده کیفیت پایین توان حرارتی خروجی اجاق خورشیدی است. با توجه به جدول ۴، بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع حدود ۶/۳۳ و ۰/۷۸ درصد کمتر از مقادیر متناظر آن در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌ها در حالت بی‌باری و برای به جوش آوردن آب انجام شده است. همچنین، عملکرد اجاق خورشیدی از دو دیدگاه انرژی و انرژی و به ازای شدت تابش خورشیدی ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر

- from Energy and Exergy Viewpoints. *Modares Mech Eng* 20(6): 1525-1532.
- [15] Mekonnen BA, Liyew KW, Tigabu MT (2020) Solar cooking in Ethiopia: Experimental testing and performance evaluation of SK14 solar cooker. *Case Stud Therm Eng* 22: 100766.
- [16] Onokwai AO, Okonkwo UC, Osueke CO, Okafor CE, Olayanju TMA, Samuel, Dahunsi O (2019) Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker. *Renew Energy* 142: 497-510.
- [17] Zhao Y, Zheng H, Sun B, Li C, Wu Y (2018) Development and performance studies of a novel portable solar cooker using a curved Fresnel lens concentrator. *Sol Energy* 174: 263-272.
- [18] Hosseinzadeh M, Mirzababae SM, Zamani H, Faezian A, Zarrinkalam F (2019) Modeling of an evacuated tube solar cooker and investigation of weather parameters effect. *Modares Mech Eng* 19(7): 1573-1584.
- [19] Hosseinzadeh M, Faezian A, Mirzababae SM, Zamani H (2020) Parametric analysis and optimization of a portable evacuated tube solar cooker. *Energy* 194: 116816.
- [20] Hosseinzadeh M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M (2019) Nanofluid and Phase Change Material Integrated into a Photovoltaic Thermal System. In: Mittal V (ed) *Phase Change Materials*, Central West Publishing, Australia, 93-127.
- [21] Shukla SK (2009) Comparison of energy and exergy efficiency of community and domestic type parabolic solar cookers. *Int J Green Energy* 6(5): 437-449.
- [22] Pandey AK, Tyagi VV, Park SR, Tyagi SK (2012) Comparative experimental study of solar cookers using exergy analysis. *J Therm Anal Calorim* 109(1): 425-431.
- [23] Hosseinzadeh M, Sadeghirad R, Zamani H, Kianifar A, Mirzababae SM (2021) The performance improvement of an indirect solar cooker using multi-walled carbon nanotube-oil nanofluid: An experimental study with thermodynamic analysis. *Renew Energy* 165: 14-24.
- [24] Cuce PM (2018) Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis. *Sol Energy* 166: 432-440.
- [25] Ghadiri M, Sardarabadi M, Pasandideh-fard M, Moghadam AJ (2015) Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *Energy Convers Manag* 103: 468-476.
- concentrated sugarcane juice used in jaggery making. *Environ Dev Sustain* 1-17.
- [3] Saxena A, Cuce E, Tiwari GN, Kumar A (2020) Design and thermal performance investigation of a box cooker with flexible solar collector tubes: An experimental research. *Energy* 206: 118144.
- [4] Ebersviller SM, Jetter JJ (2020) Evaluation of performance of household solar cookers. *Sol Energy* 208: 166-172.
- [5] Kajumba PK, Okello D, Nyeinga K, Nydal OJ (2020) Experimental investigation of a cooking unit integrated with thermal energy storage system. *J Energy Storage* 32: 101949.
- [6] Nazari S, Karami A, Bahiraei M, Olfati M, Goodarzi M, Khorasanizadeh H (2020) A novel technique based on artificial intelligence for modeling the required temperature of a solar bread cooker equipped with concentrator through experimental data. *Food Bioprod Process* 123: 437-449.
- [7] Juanicó LE (2018) Modified vacuum tubes for overheating limitation of solar collectors: A dynamical modeling approach. *Sol Energy* 171: 804-810.
- [8] Arunachala UC, Kundapur A (2020) Cost-effective solar cookers: A global review. *Sol Energy* 207: 903-916.
- [9] Hosseinzadeh M, Sadeghirad R, Zamani H, Kianifar A, Mirzababae SM, Faezian A (2021) Experimental study of a nanofluid-based indirect solar cooker: Energy and exergy analyses. *Sol Energy Mater Sol Cells* 221: 110879.
- [10] Sharma SD, Iwata T, Kitano H, Sagara K (2005) Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Sol Energy* 78(3): 416-426.
- [11] Farooqui SZ (2015) Impact of load variation on the energy and exergy efficiencies of a single vacuum tube based solar cooker. *Renew Energy* 77:152-158.
- [12] Milikias E, Bekele A, Venkatachalam C (2020) Performance investigation of improved box-type solar cooker with sensible thermal energy storage. *Int J Sustain Eng* 1-10.
- [13] Ozturk HH (2004) Energy and exergy efficiencies of a solar box-cooker. *Int J Exergy* 1(2): 202-214.
- [14] Hosseinzadeh M, Zamani H, Mirzababae SM, Faezian A, Zarrinkalam F (2020) Experimental Investigation of the Effect of Wind Speed on the Performance of a Portable Parabolic Solar Cooker