

طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد اجاق خورشیدی سهموی

ناصر بهارلو هوره^{۱*}، علی صادقی^۲، سعید گلشادی^۳

۱- استادیار، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران،

nasser.baharloo@sru.ac.ir

۲- دانش‌آموخته کارشناسی، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مکانیک، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، اصفهان، ایران

نویسنده مسئول، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، کد پستی: ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱، تلفن تماس:

۰۲۱۲۲۹۷۰۰۵۲، ۰۹۱۳۱۰۲۸۸۲۶

چکیده

با توجه به فراوانی و رایگان بودن انرژی خورشیدی در کشور و مشکلات گازرسانی، اجاق خورشیدی جایگزین بسیار مناسبی جهت پخت غذا به شمار می‌رود. در این مقاله، یک دستگاه اجاق خورشیدی سهموی طراحی، ساخته و آزمایش شد. تجهیزات مورد استفاده در ساخت، شامل دیش سهموی شکل آهنی، آئینه‌ها به منظور بازتاب نور روی نقطه کانونی، قوطی و تسمه آهنی به منظور ساخت فک و پایه نگهدارنده می‌باشد. از جمله نوآوری دستگاه حاضر می‌توان به استفاده از مواد ارزان قیمت، قابلیت بالای ارتقاء و تعمیر، کاربری ساده و استفاده آموزشی و قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی اشاره کرد. جهت اطمینان از دقت نتایج، نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و آنالیز عدم قطعیت برای همه پارامترها محاسبه شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ظرف با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و با مقدار آب ۱/۵ لیتر در این مدت‌زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه دمای آب در ظرف مسی به ۸۶ درجه و در ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در آزمایش دیگری ظرف آلومینیومی به شکل دودی (مشکی) بررسی شد که مطابق آزمایش، آب در ظرف دودی در مدت‌زمان ۲۵ دقیقه به جوش می‌آید. مطابق تحلیل ترمودینامیکی که برای محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش‌ها انجام پذیرفت، ظرف مسی متوسط با درب بسته با بازده ۱۸/۵۲ درصد و ظرف مسی کوچک با درب بسته با بازده ۱۷ درصد، به ترتیب رتبه اول و دوم را دارا هستند.

کلید واژگان: انرژی خورشیدی، اجاق خورشیدی سهموی، جوش آمدن آب، بازده انرژی، ساخت و آزمایش

Design, construction and experimental investigation of parabolic solar cooker performance

Abstract

Considering the abundance and freeness of solar energy in the country and gas supply problems, solar oven is considered a very suitable alternative for cooking food. In this paper, a parabolic solar cooker was designed, built and tested. The equipment used in the construction includes iron parabolic dish, mirrors to reflect light on the focal point, cans and iron belts to make the jaw and support base. Among the innovations of the present device, we can mention the use of cheap materials, the ability to upgrade and repair, simple use and educational use, and the ability to change the angle in all three dimensions of spatial coordinates. To ensure the accuracy of the results, the repeatability chart is presented and the uncertainty analysis is calculated for all parameters. By comparing the aluminum container and the copper container, the result is that the temperature of the water in the copper container reaches 86 degrees and in the aluminum container reaches 76 degrees Celsius in 30 minutes. In another experiment, a smoked (black) aluminum container was checked, and according to the experiment, water in the smoked container boils in 25 minutes. According to the thermodynamic analysis that was done to calculate the energy efficiency in all experiments, the medium copper pot with a closed lid with 18.52% efficiency and a small copper container with a closed lid with 17% efficiency, are ranked first and second respectively.

Keywords: solar energy, parabolic solar cooker, water boiling, energy efficiency, construction and testing

۱- مقدمه:

از جمله کاربردهای بی نظیر انرژی خورشیدی استفاده از اجاق‌های خورشیدی جهت جمع کردن و تقویت انرژی خورشید برای پخت غذا و جوشاندن آب هست. به طور کلی سه نوع اجاق خورشیدی [۱] تاکنون توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. نوع اول، اجاق خورشیدی غیرمستقیم [۲] است که اجزاء تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل کلکتور خورشیدی سهموی، واحد پخت، مخزن ذخیره کننده سیال، پمپ و لوله‌های رابط هستند. در این دستگاه‌ها کلکتور خورشیدی در خارج از ساختمان و بقیه بخش‌ها در داخل ساختمان قرار دارند که به وسیله لوله‌های رابط با بخش خارجی مرتبط می‌شوند. کارکرد این اجاق به این صورت هست که سیال عامل توسط پمپ از مخزن به سمت کلکتور خورشیدی هدایت می‌شود و پس از جذب انرژی گرمایی در بخش کلکتور خورشیدی سیال عامل به طرف واحد پخت داخل ساختمان حرکت می‌کند. نوع دوم، اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ [۳] است که اجزاء تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با یک مخزن با جنس فولاد ضدزنگ 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 که فرایند پخت مواد غذایی در داخل

لوله داخلی صورت می‌گیرد. نوع سوم، اجاق خورشیدی سهموی [۴] است که اجزا تشکیل‌دهنده این نوع اجاق‌ها شامل متمرکز کننده، پایه و نگه‌دارنده‌ها، بازوی متحرک و فک نگه‌دارنده ظرف غذا هستند. در این اجاق باید طراحی به‌گونه‌ای باشد که فک و نگه‌دارنده ظرف در نقطه کانونی اجاق سهموی قرار بگیرد و در انواع مختلف، چیدمان آینه‌ها با توجه به عملکرد و کارایی متفاوت هست. در مقاله حاضر از این نوع اجاق خورشیدی استفاده شده است. اجاق‌های خورشیدی سهموی به دلیل اینکه از بازتابندگی بیشتری نسبت به سایر انواع اجاق‌های خورشیدی بهره می‌برند، می‌توانند در زمان کوتاه‌تری دمای بالاتری را فراهم کنند.

نتو و همکاران [۵] ظرفیت پخت یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای ساخته‌شده از عناصر غیرقابل بازیافت را مورد بررسی قرار دادند و یک مدل ریاضی نیز باهدف تخمین دما را مطالعه کردند. دستگاه برای دو پیکربندی، بدون بار و بارگذاری آزمایش‌شده است. در دستگاه آن‌ها پخت شش کیک (۴,۵۰۰ گرم) با دمای بین ۱۴۴,۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۴,۵ درجه سانتی‌گراد در ۸۰ دقیقه انجام شد. مدل ریاضی آن‌ها تطابق خوبی بین نتایج نظری و تجربی نشان داد. سنسبل [۶] یک اجاق خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از یک دیش جمع‌کننده سهموی را بررسی کرد. اجاق ساخته‌شده وی دو سیلندر متحدالمرکز با باله‌های داخلی و موم پارافین دارد. میانگین راندمان انرژی و انرژی به ترتیب ۲۲٪ و ۲۰,۶٪ و زمان لازم برای رسیدن آب به ۹۰ درجه سانتی‌گراد با و بدون مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ۱۲۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه است. تافیک و همکاران [۷] طراحی جدیدی از اجاق خورشیدی مجهز به بازتابنده‌های داخلی و یک بازتابنده سهموی پایینی را ارائه دادند. آزمایش‌های پخت واقعی برای خانواده چهارنفره انجام گردید که سودمندی اجاق خورشیدی پیشنهادی را توصیف می‌کند. راندمان کلی اجاق با و بدون بازتابنده‌ها به ترتیب ۱۰/۷٪ و ۱۲/۵٪ برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که اجاق با بازتابنده قادر به رسیدن به دمای متوسط ~ ۱۴۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. جیانلوکا و همکاران [۸] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی ارزان با استفاده از لنز فرنل متمرکز نور، توانستند مقدار زیادی از تابش خورشید را روی یک منطقه کانونی کوچک متمرکز کنند؛ سپس تابش توسط یک آینه به سمت سطح پخت‌وپز، جایی که ظرف می‌تواند قرار گیرد، منعکس می‌شود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اجاق پیشنهادی می‌تواند باراندمان خوب و کاهش زمان گرمایش به دمای بالا برسد به طوری که ۳ کیلوگرم آب می‌تواند در حدود ۳۰ دقیقه به ۹۰ درجه سانتی‌گراد برسد، درحالی‌که ۳ کیلوگرم روغن سیلیکون را می‌توان در کمتر از یک ساعت از ۴۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد رساند. احمد و همکاران [۴] به طراحی، ساخت و آزمایش اجاق خورشیدی سهموی برای خانوارهای روستایی و کمپ پناهندگان پرداختند. هدف اصلی این اجاق متمرکز کردن تابش خورشید و تبدیل آن به گرما با استفاده از مواد بازتابنده مختلف بود و برخی از عوامل از جمله صاف و براق بودن سطح بازتابنده، متغیرهای کنترلی همچون سنجش دما و متغیرهای کنترل نشده همچون باد و دمای محیط در نظر گرفته شد. خروجی آزمایش‌ها بر اساس مواد بازتابنده فولاد ضدزنگ، فویل آلومینیومی و نوار مایلار مورد مطالعه قرار گرفته شد، همچنین در تحقیق آن‌ها سه شکل مختلف دما اندازه‌گیری شد؛ دمای سطح متمرکز، دمای ظرف و دمای آب. موفقیت قابل توجه این کار تحقیقاتی در حالتی بود که از نوار مایلار به‌عنوان ماده بازتابنده استفاده شد. در این حالت حداکثر دمای مشاهده‌شده در آب ۷۴,۵ درجه سانتی‌گراد، در کاغذ ۱۰۵,۴ درجه سانتی‌گراد و در چوب ۲۳۹ درجه سانتی‌گراد بود.

ال موسایی و همکاران [۹] ساختار، عملکرد و آزمایش‌های اجاق حرارتی خورشیدی سهموی را مورد بررسی قرار دادند. اجاق مدنظر در آلمان ساخته شده و برای پاسخگویی به نیازهای ساکنان روستایی و به‌طور گسترده در مراکش برای استفاده توسط ساکنانی که از چوب‌های جنگلی بهره می‌برند، طراحی شده است که نیاز به دمای پخت پایدار بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. عملکرد دستگاه آنها بر اساس تابش اشعه خورشید بر روی یک لوله خلأ شیشه‌ای است که منجر به گرم شدن روغن می‌شود. کارکرد دستگاه به این صورت است که روغن داغ شده از طریق دو لوله کوچک که با لوله بزرگ همراه هستند بالا آمده و ظرف حاوی غذای مورد نظر (به ظرفیت ۵ کیلوگرم) را گرم می‌کند. با توجه به نتایج مشاهده شده دمای روغن پخت‌وپز پس از یک ساعت حرارت دیدن به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و پخت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه انجام می‌شود. خراسانی زاده و همکاران [۱۰] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی با سه درجه آزادی به همراه یک صفحه پخت آلومینیومی به منظور پخت نان در شهر کاشان پرداختند. نتایج آنها بازده کلی اجاق را ۵۰٪ نشان داد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده این اجاق می‌تواند در ۸ ماه از سال و حداقل در ۶ ساعت از هر روز آفتابی و در هر ساعت حدود ۱۲ عدد نان با خمیر ۲۰۰ گرمی را پخت کند. حسین زاده و همکاران [۱۱] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی قابل حمل پرداختند. آن‌ها اثر سرعت‌های باد ۴،۲، ۶ و ۰،۲ متر بر ثانیه، بر بازده انرژی و انرژی را بررسی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها در طول آزمایش بازده انرژی ۳۴/۵۲ تا ۴۶/۱۹٪ و بازده انرژی آن ۲/۱۱ تا ۵/۶۰٪ به دست آمد. آن‌ها طبق نتایج تجربی زمان لازم برای به جوش آوردن ۲ لیتر آب در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه را حدود ۴۰ دقیقه به دست آوردند. رحیم زاده و همکاران [۱۲] به طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و قابل حمل پرداختند که از قطعاتی جمع شونده از جنس پلکسی و آبکاری آلومینیومی شده استفاده کردند. با توجه به نتایج آن‌ها یک ظرف از جنس آلومینیوم با توجه به دریافت ۱۰۱۲ وات بر مترمربع تشعشع ورودی خورشید، می‌تواند ۰/۵ لیتر آب را در مدت حدودا ۱۷ دقیقه به نقطه جوش برساند. حسین زاده و همکاران [۳] به بررسی یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است. همچنین میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر مترمربع برابر ۱۶/۱۶ درصد است. انوکوای و همکاران [۱۳] به بررسی بازده انرژی و انرژی یک اجاق خورشیدی سهموی پرداختند. تجزیه و تحلیل آماری آنها نشان داد تفاوتی بین نتایج تجربی و نظری که به کمک نرم افزار مینی تب بدست آمده است، نمی‌باشد و متوسط راندمان انرژی اجاق خورشیدی ۳۹ درصد است. ماریسیو گنزالز اویلز و همکاران [۱۴] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و با استفاده از یک مکانیزم مشاهده آنلاین به بررسی حرارتی اجاق پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند بهره‌وری حرارتی اجاق خورشیدی ۲۰ درصد و قدرت پخت آن ۷۵ وات می‌باشد. رگاتیری و همکاران [۱۵] به طراحی و ساخت و تست چندین نمونه اجاق خورشیدی، به منظور تعیین بهترین شکل و بهره‌وری بالا پرداختند. طبق یافته‌های آنها اجاق خورشیدی سهموی با بهره‌وری حدودا ۱۴-۱۸ درصد بهترین عملکرد را دارد.

همان‌گونه که بیان گردید مطالعات زیادی به منظور ارزیابی عملکرد اجاق‌های خورشیدی صورت گرفته است اما مواردی همچون آموزش صفر تا صد ساخت اجاق خورشیدی، استفاده از مواد ارزان قیمت، تغییر زاویه قرارگیری اجاق در سه بعد و

تحلیل ترمودینامیکی از جمله خلاءهای مطالعات پیشین بوده است. در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی با استفاده از آینه کاری گسترده و منظم طراحی، ساخته و آزمایش شد. از جمله نوآوری های تحقیق حاضر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از مواد در دسترس و ارزان قیمت در ساخت دستگاه
- قابلیت بالای ارتقا و تعمیر دستگاه
- امکان ساخت و استفاده اجاق برای آموزش در مدارس و دانشگاه ها
- قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی
- محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش ها
- بررسی تاثیر جنس ظرف، اندازه ظرف، رنگ بدنه ظرف و بررسی تاثیر نحوه قرارگیری درب ظروف بر عملکرد اجاق خورشیدی

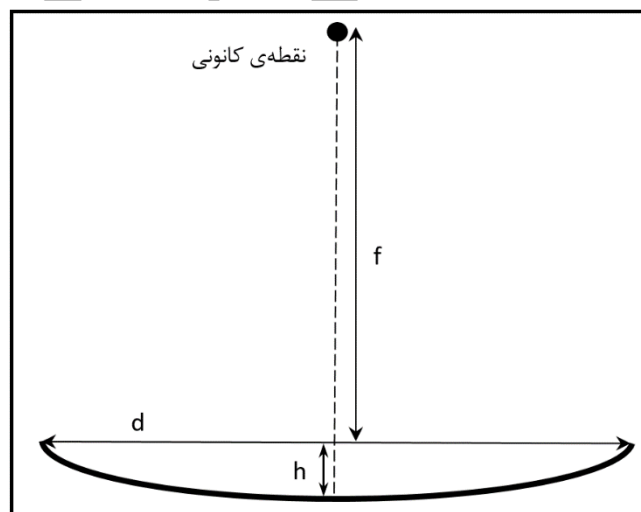
۲- طراحی و ساخت

۲-۱- محاسبه نقطه کانونی

مطابق شکل ۱، تجهیز محل قرارگیری ظرف باید در نقطه‌ی کانونی که به وسیله‌ی فرمول ۱ به دست می‌آید، قرار بگیرد [۴].

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

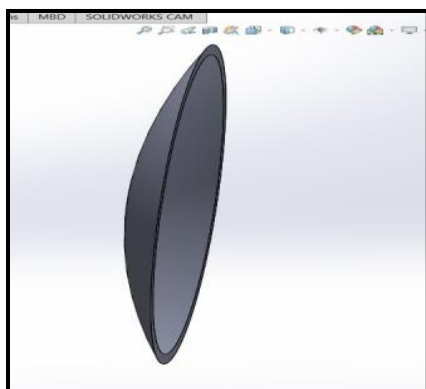
در رابطه فوق d قطر دیش و h عمق دیش هست که در این تحقیق به ترتیب مقادیر ۸۱ سانتی‌متر و ۷/۷ سانتی‌متر هستند؛ بنابراین فاصله کانونی، f ، برابر ۵۳ سانتی‌متر به دست می‌آید.



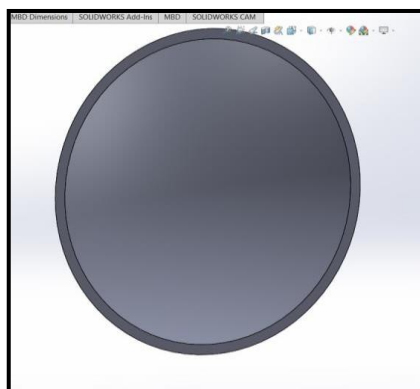
شکل ۱- شماتیک دیش و نقطه کانونی

با توجه به شکل ۱ و مشخصات موجود از اجاق خورشیدی، از نرم‌افزار سالیدورک برای طراحی سه‌بعدی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی به منظور به دست آوردن مساحت سطح روی آن استفاده شده است. در شکل ۲ مدل سازی و طراحی

نهایی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی در نرم افزار سالیدورک قابل مشاهده هست. با توجه به مدل سازی انجام شده مساحت سطح متمرکز کننده ۰/۵۳۲۹۷۱ مترمربع به دست آمده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲- مدل سازی ۳ بعدی متمرکز کننده در نرم افزار سالیدورک الف (نمای روبه رو؛ ب) نمای جانبی

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

دیش سهموی شکل: با هدف استفاده از مواد ارزان قیمت و در دسترس از یک دیش سهموی دست دوم که از قبل در اختیار محققین بود، استفاده شد. به طور کلی دیش هرچقدر عمق کمتری داشته باشد سایه کمی تولید کرده و فاصله کانونی بیشتر خواهد شد. دیش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل شماتیک ۱ اجاق خورشیدی دارای قطر ۸۱ سانتی متر و عمق ۷/۷ سانتی متر است.

آینه ها: مدیریت و بازگرداندن بیشترین مقدار ممکن از اشعه خورشید توسط انعکاس به ظرف، یکی از عوامل مهم در کارکرد مناسب اجاق است. میزان بازتاب آینه ۹۵٪ است در صورتی که آلومینیوم جلا داده شده ۸۵٪ است. لذا برای بهره گیری از بیشترین بازتاب از آینه استفاده شده است. در این اجاق حدوداً ۴۳۵ عدد آینه استفاده شده است.

قوطی پروفیل آهن و تسمه آهنی: باید سازه ای طراحی شود که از استحکام بالایی برخوردار باشد تا در شرایط جوی و باد دچار مشکل نشود. برای ساخت پایه و فک نگه دارنده ی ظرف از قوطی آهنی استفاده شده است تا ضمن استحکام بخشیدن به اجاق و مقاومت در برابر شرایط جوی و باد، تعادل ظرف را نیز برقرار کند. همچنین به دلایل ذکر شده و نیز اتصال بهتر اجزاء از تسمه آهنی مطابق شکل ۳ استفاده شده است.



شکل ۳- استفاده از تسمه آهنی برای استحکام و اتصال

پیچ و مهره و چسب: برای اتصال تسمه به دیش و ساخت پایه متحرک و اتصال آن‌ها به هم از پیچ و مهره استفاده می‌شود. همچنین برای چسباندن آئینه‌ها به صفحه‌ی دیش از چسب آکوارיום استفاده می‌شود. این چسب‌ها به دلیل اینکه مدت تقریباً زیادی طول می‌کشد تا خشک شوند برای این کار بسیار مناسب هستند چون برای تنظیم آئینه‌ها به فرصت کافی احتیاج هست.

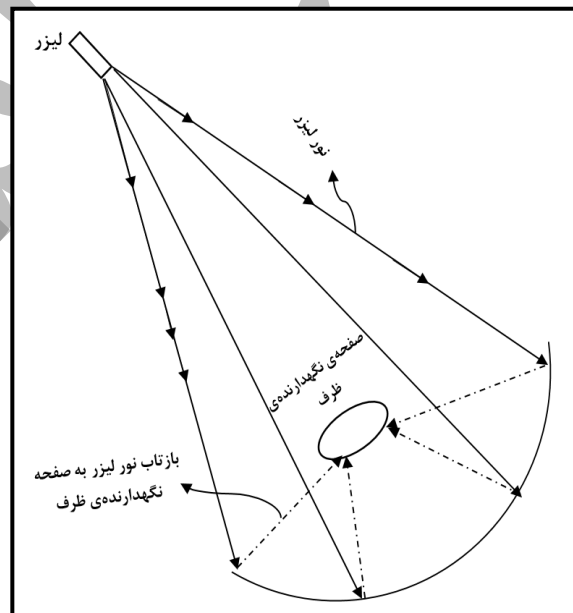
۲-۳- اتصال و اسمبل قطعات

ابتدا قوطی‌ها به اندازه‌های مشخص به حالت ۹۰ درجه به یکدیگر جوش داده می‌شود و تقریباً از وسط، آن‌ها را دو چاک می‌دهیم تا انتهای قوطی‌ها به یکدیگر برسند و آن‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و برای محکم‌تر شدن و سنگین‌تر شدن آن بین دو قوطی هم دوتکه‌ی دیگر قرار می‌گیرد و جوش داده می‌شود. برای تغییر درجه‌ی صفحه و تنظیم آن به سمت خورشید باید بازوئی محرک ساخته شود. به همین منظور دو تکه تسمه در انتهای پایه جوش داده می‌شود و دو قوطی طوری قرار می‌گیرند که قوطی کوچک‌تر بتواند داخل قوطی بزرگ‌تر آزادانه حرکت کند. روی قوطی کوچک‌تر با فاصله‌های ۲ سانتی‌متر سوراخ قرار می‌گیرد تا در هر درجه‌ای که موردنیاز است، قرار گیرد و ثابت شود (شکل ۴). فلش‌های قرمز رنگ در شکل ۴ نشان‌دهنده روش‌های حرکت و تنظیم زاویه و مختصات مکانی در سه بعد هست.



شکل ۴- پایه نگهدارنده و بازوی متحرک جهت تنظیم زاویه در سه بعد

آینه‌ها به اشکال مربعی $3/5$ در $3/5$ سانتی‌متر برش داده می‌شود. برش‌های کوچک‌تر باعث یکپارچه شدن آینه‌ها و اختلاف ارتفاع کمتر و تنظیم دقیق آن‌ها به سمت فاصله کانونی می‌شود. روش‌های مختلفی برای تنظیم کردن زاویه آینه‌ها وجود دارد. در این آزمایش صفحه‌ی دیش را زاویه‌ی دلخواهی قرار می‌دهیم و کاغذی را در صفحه‌ی کوچک به‌جای ظرف قرار می‌دهیم و لیزری را بافاصله‌ی چند متری از صفحه‌ی دیش و در همان زاویه‌ی صفحه‌ی قرار می‌دهیم. لیزر در همان جایی که قرار دارد به‌عنوان جایگزین خورشید است و به ترتیب نور لیزر را در تک‌تک آینه‌ها می‌اندازیم. اگر نور لیزر به وسط صفحه‌ی کاغذی برخورد کرد یعنی زاویه آینه مناسب است (شکل ۵). شکل نهایی دستگاه اجاق خورشیدی به‌صورت شکل ۶ است.



شکل ۵- نحوه تنظیم زاویه آینه‌ها



شکل ۶- تصویر واقعی و نهایی دستگاه اجاق خورشیدی

۳- تحلیل ترمودینامیکی (محاسبه بازده انرژی)

در این قسمت، تحلیل ترمودینامیکی با هدف محاسبه بازده انرژی صورت می‌پذیرد [۱۶].

نرخ انرژی ورودی در اجاق خورشیدی سهموی به‌عنوان سیستم در نظر گرفته‌شده، انرژی خورشید است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\dot{E}_s = I_{ave} A_{ap} \quad (2)$$

در رابطه (۲) میانگین نرخ تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی سهموی در یک فاصله زمانی است که مقدار ۹۴۱ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [۱۷]. A_{ap} نیز مساحت دهانه متمرکز کننده خورشیدی است که در بخش ۱-۲ به دست آمد. نرخ انرژی حرارتی مصرف شده مطابق رابطه (۳) برابر است با مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز برای رسیدن آب به دمای مشخص بر واحد زمان [۱۷], [۱۸]:

$$\dot{E}_w = \frac{m_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i})}{\Delta t} \quad (3)$$

در رابطه بالا، m_w و C_w به ترتیب جرم و ظرفیت گرمایی ویژه آب، $T_{w,i}$ و $T_{w,f}$ نیز به ترتیب بیانگر دمای آب در ابتدا و انتهای مدت زمان آزمایش است. برای آزمایش‌هایی که آب در آنها به نقطه جوش می‌رسد، نقطه نهایی را همان نقطه جوش در نظر می‌گیریم و واحد زمانی Δt نیز مدت زمانی است که بر حسب ثانیه طول می‌کشد تا آب به دمای ۱۰۰ درجه برسد.

جهت بررسی عملکرد حرارتی دستگاه ساخته‌شده باید بازدهی حرارتی دستگاه نیز مورد بررسی قرار بگیرد که با استفاده از رابطه (۲) و (۳)، بازده انرژی اجاق خورشیدی سهموی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\dot{E}_w}{\dot{E}_s} \quad (4)$$

محاسبات برای آزمایش‌های مختلف بر اساس روابط فوق و داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده، انجام گردیده و در آخرین بخش مقاله آورده شده‌است.

۴- بررسی تجربی عملکرد

۴-۱- عدم قطعیت

آنالیز عدم قطعیت برای همه آزمایش‌ها با استفاده از روش مفات [۱۹] انجام گرفت. اگر پارامتر F با استفاده از تابعی مطابق رابطه زیر محاسبه شود:

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (5)$$

مقدار عدم قطعیت در اندازه‌گیری و یا محاسبه پارامتر F از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$\delta F = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

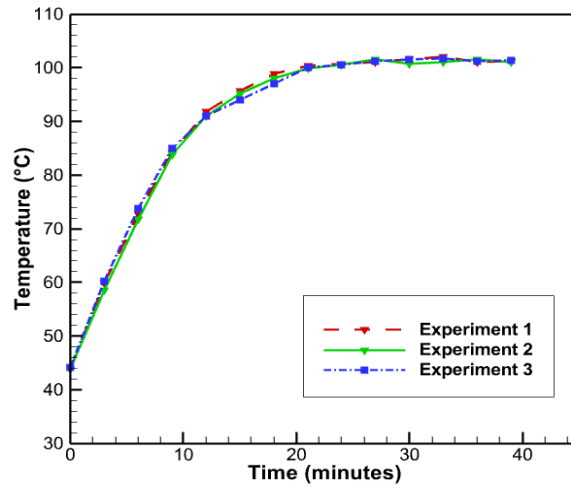
در رابطه بالا، Δx_i عدم قطعیت در اندازه‌گیری یا محاسبه متغیر x_i است. برای پارامترهایی که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند؛ عدم قطعیت همان دقت وسیله اندازه‌گیری است. تنها متغیری که بصورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود دما می‌باشد که عدم قطعیت آن 0.5 درجه سلسیوس است. عدم قطعیت کلیه پارامترها با استفاده از رابطه (۶) حساب شده و در جدول ۱ بیان شده است. دماسنج دیجیتالی از نوع دماسنج دیجیتالی tes-۱۳۰۶ ساخت کمپانی Tes تایوان می‌باشد.

جدول ۱- عدم قطعیت کلیه مشخصه‌های محاسبه شده

پارامتر	نماد	واحد	عدم قطعیت
دمای محیط (دماسنج جیوه‌ای)	$T_{amb,ave}$	□	± 0.5
دمای آب (دماسنج دیجیتالی)	$T_{w,f}$	□	± 0.5
زمان (کرونومتر دیجیتالی)	Δt	s	± 0.01
نرخ انرژی حرارتی	\dot{E}_w	W	$\pm 1/2$
بازده انرژی اجاق	η	درصد	± 0.4

۴-۲- تکرارپذیری

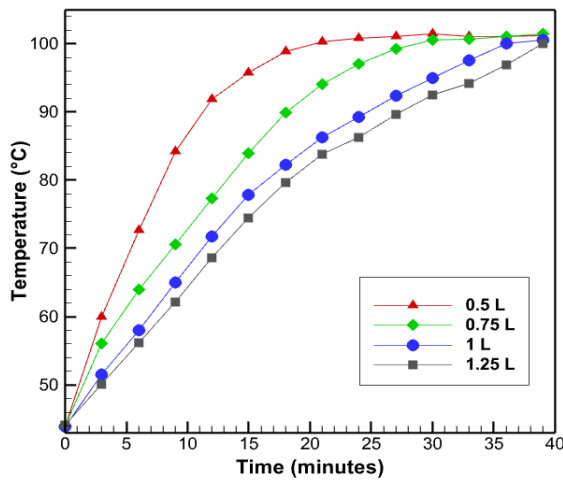
برای اطمینان از صحت داده‌های اندازه‌گیری و افزایش دقت نتایج، هر آزمایشی حداقل سه مرتبه تکرار شده است. برای مثال در شکل ۷ نتایج حاصل از سه مرتبه تکرار در آزمایش ۱ که مربوط به 0.5 لیتر آب در ظرف مسی اندازه متوسط بود، نشان داده شده است. در همه نمودارها میانگین نتایج سه تکرار به‌عنوان داده نهایی ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار تکرارپذیری

۳-۴- بررسی تأثیر مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت بر دمای آب

در این آزمایش مقادیر متفاوت آب در داخل یک ظرف مسی با اندازه یکسان (قطر کف ظرف مسی ۱۸ سانتی‌متر) مورد آزمایش قرار داده شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید در این آزمایش به‌طور میانگین ۴۶ تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد بود. با توجه به نمودار شکل ۸ طبق آزمایش‌های انجام‌شده مقدار ۰/۵ لیتر آب پس از گذشت ۲۰ دقیقه به نقطه جوش (دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد. در همین مدت مقدار ۰/۷۵ لیتر آب به دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد، ۱ لیتر آب به دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۱/۲۵ لیتر آب به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسند.



(ب)

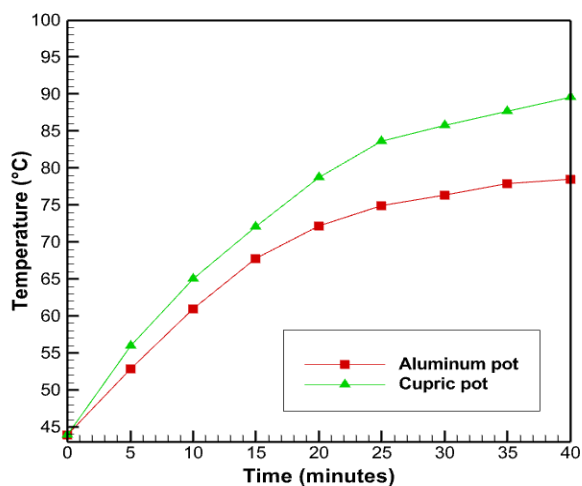


(الف)

شکل ۸- تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت: (الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی متوسط و (ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

۴-۴- بررسی تأثیر جنس ظرف مسی و آلومینیومی بر دمای آب

در این آزمایش دو ظرف مسی و آلومینیومی با ابعاد تقریباً برابر (قطر کف ظرف حدوداً ۱۶ سانتی‌متر) با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب بررسی شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به‌طور میانگین از ۳۴ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد متفاوت بوده است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است در مدت‌زمان ۴۰ دقیقه ظرف مسی به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ظرف آلومینیومی به دمای ۷۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسند. در نتیجه در یک مدت معین دمای آب در ظرف مسی بیشتر از دمای آب در ظرف آلومینیومی بالا می‌رود. علت این نتیجه را می‌توان بیشتر بودن میزان رسانندگی گرمایی فلز مس ($398 \frac{W}{mK}$) در مقایسه با فلز آلومینیوم ($248 \frac{W}{mK}$) [۲۰]، بیان کرد.



(ب)

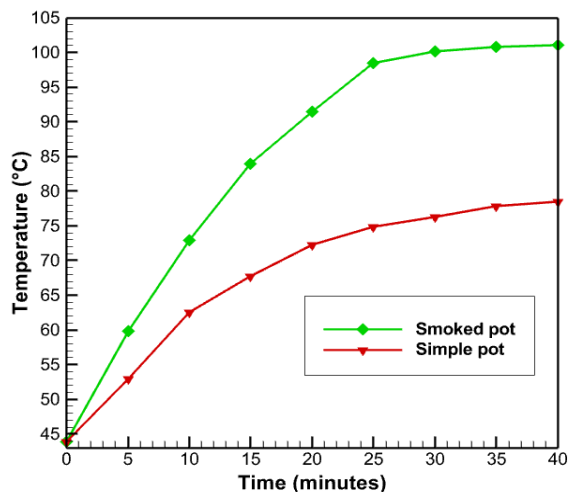


(الف)

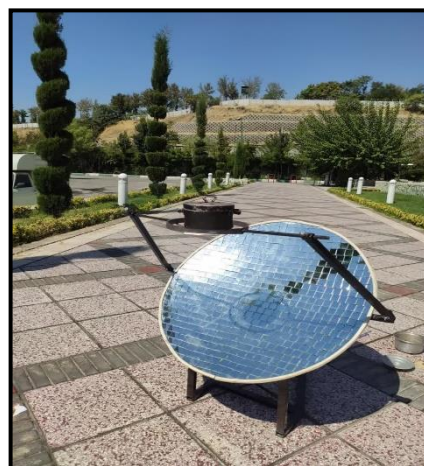
شکل ۹- تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر جنس ظرف (مسی و آلومینیومی): (الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی و (ب) نمودار نتایج آزمایش

۴-۵- بررسی تأثیر رنگ سیاه به جذب گرمای خورشید

در این آزمایش ظرف آلومینیومی معمولی و دودی شده آن با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب (قطر کف ظرف ۱۶ سانتی‌متر) در دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد تحت تابش مستقیم خورشید بررسی شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است ظرف آلومینیومی دودی در مدت ۲۵ دقیقه به دمای جوش می‌رسد در حالی که ظرف آلومینیومی معمولی در طی این مدت به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. می‌توان گفت مقدار آب داخل ظرف دودی در مقایسه با ظرف آلومینیومی معمولی در مدت‌زمان یکسان به دمای بالاتری می‌رسد. علت این امر بالا بودن ضریب جذب تشعشع جسم سیاه است. در واقع هرچه جسم تیره‌تر باشد جذب بالاتر و هر چه روشن‌تر باشد بازتاب بالاتر دارد.



(ب)

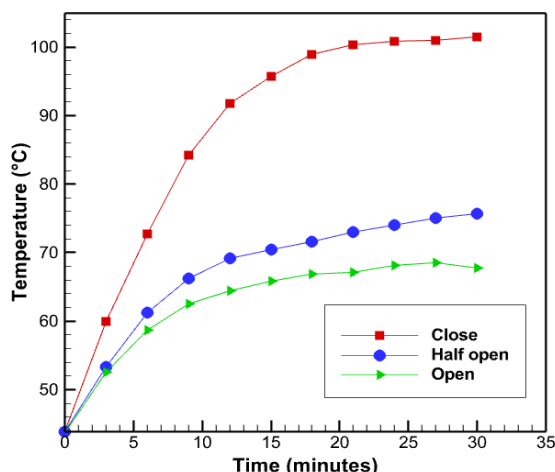


(الف)

شکل ۱۰- تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی بررسی تأثیر رنگ سیاه: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی دودی و ب) نمودار نتایج آزمایش

۴-۶- بررسی تأثیر نوع قرارگیری درب ظرف به دمای آب

در این آزمایش ظرف مسی (با قطر کف ظرف برابر ۱۸ سانتی‌متر) و مقدار ۰/۵ لیتر آب با توجه به نوع قرارگیری درب ظرف (باز، بسته، نیمه‌باز) بررسی می‌شود. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به‌طور میانگین بین ۵۰ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده است. مطابق نمودار شکل ۱۱، اگر درب ظرف به‌طور کامل روی ظرف قرار بگیرد (ظرف کاملاً در بسته باشد)، آب درون ظرف در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به نقطه جوش می‌رسد در حالی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و باز باشد در همین مدت‌زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. می‌دانیم که اگر تابش نور مستقیم باشد دمای بالاتر باید حاصل شود اما باز بودن درب ظرف، سبب برقراری انتقال حرارت همرفتی می‌شود که سبب کاهش دمای آب خواهد شد. لذا می‌توان گفت تأثیر منفی انتقال حرارت همرفتی بر تأثیر مثبت تابش مستقیم غلبه کرده‌است. وجود نسیم و باد اگرچه اندک باشد در افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی تأثیر مستقیمی دارد که در این آزمایش و نیز در هر منطقه‌ای که اجاق خورشیدی بخواد استفاده شود تأثیر خواهد گذاشت.



(ب)

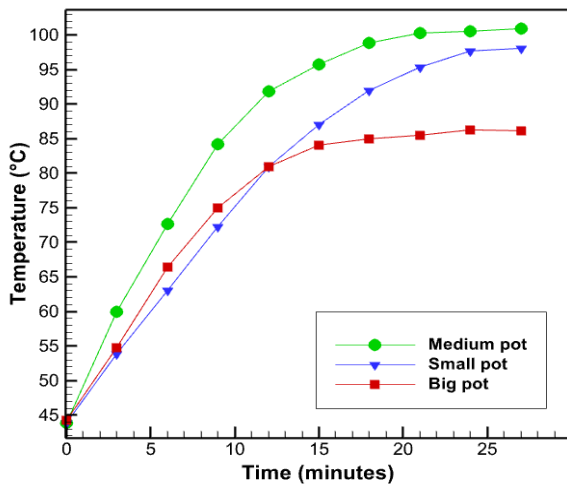


(الف)

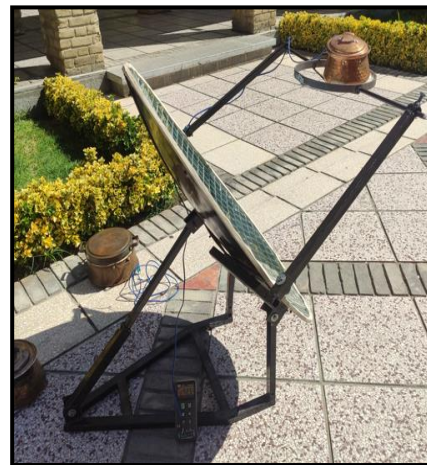
شکل ۱۱- تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تاثیر نحوه قرار گیری درب ظرف: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی با درب باز ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

۴-۷- بررسی تأثیر اندازه ظرف بر دمای آب

در این آزمایش سه ظرف مسی کوچک (قطر کف ظرف حدود ۱۶ سانتی‌متر)، متوسط (قطر کف ظرف حدود ۱۹ سانتی‌متر) و بزرگ (قطر کف طرف حدود ۲۲ سانتی‌متر) با مقدار مساوی ۰/۵ لیتر آب بررسی شده‌است. با توجه به نمودار شکل ۱۲ ظرف مسی متوسط در زمان کمتری نسبت به دو ظرف دیگر به جوش می‌آید. آب موجود در ظرف مسی متوسط در دقیقه ۲۰ به نقطه جوش می‌رسد. در همین زمان، ظرف کوچکتر ۶ درجه دمای پایین تر است. دو ظرف مسی با اندازه کوچک و بزرگ تقریباً تا دقیقه ۱۳ رفتار مشابه دارند ولی از دقیقه ۱۳ به بعد ظرف مسی کوچک روند صعودی خود را حفظ کرده ولی روند صعودی ظرف بزرگ ضعیف و در نهایت در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌شود. برای توجیه این رفتار باید به اندازه پهنای کف ظرف‌ها و نسبت آن با اندازه پهنای نقطه کانونی اشاره کرد. ذکر این نکته به عنوان مقدمه تحلیل ضروری است که نقطه کانونی یعنی محل تمرکز و تجمع بازتاب نور از آینه‌ها، در واقع یک نقطه نیست بلکه یک مساحتی شبیه دایره است. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی (محل تجمع نورهای بازتاب شده) مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد (قطر ۱۹ سانتی‌متر)، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچکتر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی، از تمام نورهای بازتاب شده نمی‌تواند استفاده کند و بخشی از نورهای بازتاب شده بلا استفاده در محیط منعکس می‌شود. ظرف بزرگتر نیز با وجود اینکه تمام نورهای بازتاب شده را دریافت می‌کند، اما بخشی از مساحت کف ظرف در معرض بازتاب نورها نیست و همین بخش، سهمی از گرمای دریافتی ناشی از بازتاب نورهای تجمع شده را از طریق رسانش جذب می‌کند و این گرما را از طریق انتقال حرارت جابجایی به محیط منتقل می‌کند. نهایتاً تمام این پدیده‌ها منجر به عملکرد ضعیف‌تر ظرف بزرگتر می‌شود. میزان انتقال حرارت از ظرف بزرگتر به محیط به اندازه‌ای است که از دقیقه ۲۰ بعد انتقال حرارت حالت دائم پیدا می‌کند یعنی نرخ دریافت و تحویل حرارت برابر می‌شود و دما در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر اندازه ظرف: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظروف مسی ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

۸-۴- نتایج محاسبات انرژی

محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف مطابق جدول ۲ به دست می‌آید. به جهت مقایسه درست و شرایط یکسان، همه ظرف‌های اشاره شده در جدول، به اندازه ۰/۵ لیتر آب در خود جای داده اند. مطابق جدول بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی متوسط با درب بسته و پس از آن ظرف مسی کوچک با درب بسته و ظرف آلومینومی دودی در رتبه‌های دوم و سوم هستند.

جدول ۲ - محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف

بازده انرژی (درصد)	انرژی مصرفی (وات)	
۱۸/۵۲	۹۲/۸۸۹	ظرف مسی متوسط درب کاملاً بسته
۷/۶۷	۳۸/۴۸۳	ظرف مسی متوسط درب کاملاً باز
۹/۶۶	۴۸/۴۳۵	ظرف مسی متوسط درب نیمه باز
۱۳/۶۶	۶۸/۵۰۶	ظرف مسی بزرگ با درب بسته
۱۷	۸۵/۲۵۹	ظرف مسی کوچک با درب بسته
۹/۶۲	۴۸/۲۶۹	ظرف آلومینومی
۱۶/۹۳	۸۴/۹۲۷	ظرف آلومینومی دودی

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی باقابلیت کاربری ساده و استفاده آموزشی ساخته شد. نصب مجموعه آینه‌ها با اندازه کوچک و تعداد بالا با تنظیم دقیق زاویه بر اساس بازتاب نور روی نقطه کانونی صورت پذیرفت. برای کلیه تجهیزات از مواد در دسترس و ارزان قیمت استفاده شد. این دستگاه قابلیت بالا و راحت ارتقا را داراست. همچنین با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در ساعت‌های متفاوت، قابلیت تغییر زاویه در سه بعد مختصات مکانی را داراست. جهت اطمینان از آزمایش‌ها نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و جهت اطمینان از دقت نتایج، آنالیز عدم قطعیت صورت پذیرفته‌است. نتایج زیر بطور خلاصه از آزمایش‌ها حاصل گردید:

۱- ظرف مسی با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و مقدار ۱۰۵ لیتر آب در این مدت‌زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۲- با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه درجه حرارت ظرف مسی به ۸۶ درجه سانتی‌گراد و ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۳- در بررسی تأثیر رنگ مواد در جذب گرما مشاهده شد که ظرف آلومینیومی دودی و غیر دودی به ترتیب در مدت‌زمان ۲۵ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسند

۴- در بررسی تأثیر نحوه قرارگیری درب ظرف، مطابق آزمایش که اگر درب ظرف به‌طور کامل روی ظرف قرار بگیرد در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و یا باز باشد در همین مدت‌زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد

۵- برای مقایسه اندازه ظرف، عملکرد اجاق خورشیدی با سه ظرف کوچک، متوسط و بزرگ مسی مورد بررسی قرارگرفت. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچکتر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی و ظرف بزرگتر نیز به دلیل بیشتر بودن این مساحت، عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند.

۶- نتیجه محاسبات ترمودینامیکی جهت استخراج بازده انرژی، نشان می‌دهد بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی متوسط با درب بسته با ۱۸/۵۲ درصد است و پس از آن ظرف مسی کوچک با درب بسته با ۱۷ درصد و ظرف آلومینیومی دودی با ۱۶/۹۳ درصد به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم هستند.

۶- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گزنت شماره ۴۹۹۱ مورخ ۱۴۰۲/۰۶/۰۳ انجام گردیده است.

۷- مراجع:

- [1] U. C. Arunachala and A. Kundapur, "Cost-effective solar cookers: A global review," *Sol. Energy*, vol. 207, pp. 903–916, (2020).
- [2] M. Hosseinzadeh, S. Alizadeh Momen, S. M. Mirzababae, H. Zamani, and A. Kianifar, "Experimental Investigation of Indoor Cooking Using an Indirect Solar Cooker Integrated with Heat Storage Materials," *J. Solid Fluid Mech.*, vol. 11, no. 3, pp. 207–219, (2021).
- [3] M. Hosseinzadeh, S. M. Mirzababae, and H. Zamani, "Thermodynamic Analysis of an Evacuated Tube Solar Cooker under Different Operating Conditions," *J. Solid Fluid Mech.*, vol. 11, no. 5, pp. 259–268, (2021).
- [4] S. M. M. Ahmed, M. R. Al-Amin, S. Ahammed, F. Ahmed, A. M. Saleque, and M. Abdur Rahman, "Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp," *Sol. Energy*, vol. 205, pp. 230–240, (2020).
- [5] R. V. P. Neto, L. G. M. de Souza, J. C. de Lima, L. G. V. M. de Souza, and E. V. Mendes, "Theoretical-experimental study of a box-type solar oven made from disused recyclable elements," *Sol. Energy*, vol. 230, pp. 732–746, (2021).
- [6] R. Senthil, "Enhancement of productivity of parabolic dish solar cooker using integrated phase change material," *Mater. Today Proc.*, vol. 34, pp. 386–388, (2021).
- [7] M. A. Tawfik, A. A. Sagade, R. Palma-Behnke, H. M. El-Shal, and W. E. Abd Allah, "Solar cooker with tracking-type bottom reflector: An experimental thermal performance evaluation of a new design," *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 295–315, (2021).
- [8] G. Coccia, A. Aquilanti, S. Tomassetti, A. Ishibashi, and G. Di Nicola, "Design, manufacture and test of a low-cost solar cooker with high-performance light-concentrating lens," *Sol. Energy*, vol. 224, pp. 1028–1039, (2021).
- [9] N. El Moussaoui *et al.*, "Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC)," *Sol. Energy*, vol. 201, pp. 866–871, (2020).
- [10] H. Khorasanizade, M. Sabzpooshani, and S. Nazari, "Design, Manufacture and Testing a Solar Bread Cooker with Concentrator," *Modares Mech. Eng.*, vol. 13, no. 13, pp. 1–13, (2014) [In Persian].
- [11] F. Z. M. Hosseinzadeh, H. Zamani, S. M. Mirzababae, and A. Faezian, "Experimental Investigation of the Effect of Wind Speed on the Performance of a Portable Parabolic Solar Cooker from Energy and Exergy Viewpoints," *Modares Mech. Eng.*, vol. 20, no. 6, pp. 1525–1532, (2020) [In Persian].
- [12] H. Rahimzadeh, M. Nasiri, and A. S. Qomi, "Design and construction and thermal investigation of a portable parabolic solar oven," *27th annual international conference of the Iranian Mechanical Engineers Association*, Iran, pp. 3168–3172, April 30, (2019) [In Persian].
- [13] A. O. Onokwai, U. C. Okonkwo, C. O. Osueke, C. E. Okafor, T. M. A. Olayanju, and S. O. Dahunsi, "Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker," *Renew. Energy*, vol. 142, pp. 497–510, (2019).
- [14] M. González-Avilés, O. R. Urrieta, I. Ruiz, and O. M. Cerutti, "Design,

- manufacturing, thermal characterization of a solar cooker with compound parabolic concentrator and assessment of an integrated stove use monitoring mechanism,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 45, pp. 135–141, (2018).
- [15] A. Regattieri, F. Piana, M. Bortolini, M. Gamberi, and E. Ferrari, “Innovative portable solar cooker using the packaging waste of humanitarian supplies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, (2017).
- [16] M. Hosseinzadeh, M. Sardarabadi, F. Passandideh, “ Nanofluid and Phase Change Material Integrated into a Photovoltaic Thermal System,” *Phase Change Materials, Central West Publishing, Australia*, pp. 93-127, (2019).
- [17] S. K. Shukla, “Comparison of Energy and Exergy Efficiency of Community and Domestic Type Parabolic Solar Cookers,” *Int. J. Green Energy*, vol. 6, no. 5, pp. 437–449, (2009).
- [18] P. M. Cuce, “Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis,” *Sol. Energy*, vol. 166, pp. 432–440, (2018).
- [19] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Exp. Therm. fluid Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, (1988).
- [20] I. L. Pioro, M. Mahdi, and R. Popov, “Heat transfer media and their properties,” *Handb. Therm. Sci. Eng.*, pp. 1353–1446, (2018).