



بررسی تجربی پخت‌وپز در داخل ساختمان با استفاده از یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با مواد ذخیره کننده حرارت

محمد حسین زاده^۱، صالح عزیززاده مؤمن^۲، سید مهدی میرزابابائی^{۳*}، حسین زمانی^۳ و علی کیانی‌فر^۴

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

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

^۴ استناد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

در این مطالعه، امکان پخت‌وپز در داخل ساختمان در یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده به صورت تجربی بررسی شده است؛ همچنین، اثر مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزا هیدرات بر عملکرد واحد پخت اجاق خورشیدی با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور، ابتدا مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از اجاق خورشیدی غیرمستقیم شارژ شده و در ادامه از انرژی ذخیره شده در این مواد برای گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر استفاده شده است. با توجه به نتایج، استانیلید در طول فرایند شارژ به نقطه ذوب خود نرسیده است؛ در حالی که انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان و محسوس در منیزیم نیترات هگزا هیدرات ذخیره شده است؛ همچنین با استفاده از انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده، دمای ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر پس از گذشت ۸ و ۱۲ دقیقه به نقطه جوش رسیده است. مدت زمان سپری شده برای تغییر دمای ۰/۵ لیتر آب از نقطه جوش تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات ۴ ساعت و ۴۲ دقیقه است که نسبت به واحد پخت همراه با استانیلید ۱ ساعت و ۵۰ دقیقه بیشتر است.

کلمات کلیدی: اجاق خورشیدی غیرمستقیم؛ ماده تغییر فاز دهنده؛ استانیلید؛ منیزیم نیترات هگزا هیدرات.

Experimental Investigation of Indoor Cooking Using an Indirect Solar Cooker Integrated with Heat Storage Materials

M. Hosseinzadeh¹, S. Alizadeh Momen², S.M. Mirzababae^{3,*}, H. Zamani³, A. Kianifar⁴

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

² Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

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

⁴ Professor, Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In this study, the possibility of indoor cooking in an indirect solar cooker integrated with phase change material is experimentally investigated. Moreover, the effect of using acetanilide and magnesium nitrate hexahydrate (as the phase change materials) on the performance of the cooking unit of the solar cooker is compared. For this purpose, the phase change materials are charged by the indirect solar cooker initially. The stored energy in these materials is then utilized to heat 0.5 L and 1 L of water in the afternoon. Based on the results, acetanilide cannot reach its melting point during the charging process; however, thermal energy is stored as sensible and latent heat in magnesium nitrate hexahydrate. Using the stored energy in the phase change materials, the time required to boil 0.5 L and 1 L of water in the afternoon is 8 min and 12 min respectively. In the cooking unit with magnesium nitrate hexahydrate, the temperature of 0.5 L of boiling water reduces to 80 °C after passing 4 h and 42 min, which is 1 h and 50 min higher than that of the cooking unit with acetanilide.

Keywords: Indirect Solar Cooker; Phase Change Material; Acetanilide; Magnesium Nitrate Hexahydrate.

۱- مقدمه

امروزه نیاز به تأمین انرژی به‌منظور پخت مواد غذایی در سطح جهان در حال افزایش است [۱]. آمارها نشان می‌دهد که حدود ۲/۶ بلیون نفر در دنیا انرژی لازم برای پخت‌ویز را با استفاده از منابع انرژی غیرپاک تأمین می‌کنند [۲]. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از چوب به دلیل ارزان بودن به‌منظور پخت مواد غذایی استفاده می‌شود [۳]. این امر علاوه بر مشکلات بوم‌شناختی مانند جنگل‌زدایی و نابودی برخی از زیستگاه‌ها سبب آلودگی محیط‌زیست شده است؛ بنابراین، بهره‌گیری از منابع انرژی پاک به‌منظور تأمین انرژی پخت‌ویز مورد توجه جوامع مختلف قرار گرفته است.

یکی از روش‌های تأمین انرژی پخت‌ویز به روش پاک استفاده از اجاق‌های خورشیدی است. یکی از انواع اجاق‌های خورشیدی موجود اجاق‌های خورشیدی مستقیم هستند که در آن‌ها از انرژی خورشیدی مستقیماً در فرایند پخت استفاده می‌شود. اجاق‌های خورشیدی جعبه‌ای [۴ و ۵] و اجاق‌های خورشیدی با متمرکز کننده [۶ و ۷] نیز در این دسته قرار می‌گیرند. یکی از مشکلات اجاق‌های خورشیدی مستقیم حضور کاربر در زیر نور آفتاب در حین فرایند پخت مواد غذایی است. برای رفع این مشکل، اجاق‌های خورشیدی غیرمستقیم عرضه شده است. در این نوع از اجاق‌های خورشیدی، ابتدا یک سیال عامل توسط کلکتور خورشیدی در فضای بیرون از ساختمان گرم می‌شود. در ادامه، انرژی دریافتی توسط سیال عامل می‌تواند در یک سیستم پمپی یا ترموسیفون به محل پخت غذا در داخل ساختمان منتقل شود [۸ و ۹]. یکی دیگر از چالش‌های اجاق‌های خورشیدی موجود وابستگی آن‌ها به حضور تابش خورشیدی است؛ بنابراین، این اجاق‌ها در عصر و هوای ابری که میزان تابش خورشیدی موردنیاز برای پخت مواد غذایی وجود ندارد کارایی خود را از دست می‌دهند. به‌منظور مقابله با این مشکل می‌توان از مواد ذخیره‌ساز گرمای محسوس یا نهان در ساختار اجاق‌های خورشیدی استفاده کرد [۱۰ و ۱۱]؛ بنابراین، انرژی خورشیدی در طول روز به‌صورت انرژی گرمایی در این مواد ذخیره می‌شود تا در زمانی که تابش کافی برای پخت‌ویز وجود ندارد، مورد استفاده قرار گیرد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه استفاده از مواد ذخیره‌کننده حرارت در ساختار اجاق‌های خورشیدی مختلف انجام شده است. آرامش و

همکاران [۱۲]، در یک مقاله مروری به بررسی پژوهش‌های گذشته در زمینه استفاده از مواد ذخیره‌ساز گرمای محسوس و نهان بر عملکرد اجاق‌های خورشیدی پرداختند. آنها همچنین پژوهش‌های گذشته را از دیدگاه اقتصادی و اجتماعی مورد مطالعه قرار دادند.

دومانسکی و همکاران [۱۳]، در یک مطالعه تجربی اثر مواد تغییر فاز دهنده اسید استئاریک^۱ و منیزیم نیترات^۲ هگزا‌هیدرات^۳ را بر عملکرد یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که شدت تابش خورشیدی، میزان آب داخل ظرف غذا و خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده به‌خصوص دمای ذوب و ضریب هدایت حرارتی عملکرد اجاق خورشیدی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. کوکیا و همکاران [۱۴]، به‌صورت تجربی عملکرد یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای همراه با ماده تغییر فاز دهنده اریتریتول^۴ را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که با استفاده از اجاق خورشیدی، دمای روغن سیلیکون^۵ در مدت زمان ۲/۵۲ ساعت از ۵۵ به ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. بودی و همکاران [۱۵]، در یک مطالعه تجربی امکان پخت جرم‌های مختلفی از برنج را در یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای همراه با ماده تغییر فاز دهنده استانیلید^۶ مورد پژوهش قرار دادند. در مطالعه آن‌ها، پخت ماده غذایی در عصر و به کمک انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده صورت گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند که ۰/۴ کیلوگرم برنج همراه با ۱/۲ کیلوگرم آب در مدت زمان دو ساعت (از ساعت ۱۹:۳۰ تا ۲۱:۳۰) به کمک ماده تغییر فاز دهنده پخته می‌شود. چن و همکاران [۱۶]، به‌صورت عددی اثر مواد تغییر فاز دهنده مختلف را بر عملکرد یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای مقایسه کردند. مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده در مطالعه آن‌ها اسید استئاریک، منیزیم نیترات هگزا‌هیدرات، استانیلید، اریتریتول و استامید^۷ است. آن‌ها توصیه کردند که در ساختار اجاق‌های خورشیدی جعبه‌ای بهتر است، از مواد تغییر فاز دهنده اسید استئاریک و

¹ Stearic Acid

² Magnesium Nitrate Hexahydrate

³ Erythritol

⁴ Silicone

⁵ Acetanilide

⁶ Acetamide

دهنده دی-مانیتول^۵ است. آن‌ها مشاهده کردند که با استفاده از استفاده از انرژی ذخیره شده در مخزن ذخیره گرما، دمای ۱ لیتر روغن زیتون در مدت ۱۵ دقیقه از ۲۶ به ۱۵۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که بازده واحد پخت ۷۳/۵ درصد است. ماسرد و نایدل [۲۰]، به‌صورت عددی و تجربی اثر پوشش شیشه‌ای را بر عملکرد یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده بررسی کردند. در بستر آزمایشگاهی آن‌ها، کلکتور خورشیدی از نوع سهموی خطی بوده و در واحد پخت، ماده تغییر فاز دهنده در ۸ سیلندر استوانه‌ای شکل داخل سیال عامل قرار گرفته است. سیال عامل استفاده شده در مطالعه آن‌ها روغن دوراترم^۶ ۶۳۰ و ماده تغییر فاز دهنده نمک‌های نیترات سدیم و پتاسیم است. بررسی آن‌ها نشان داد که وجود پوشش شیشه‌ای در اطراف لوله جاذب گرما برای ذوب ماده تغییر فاز دهنده در دمای بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ضروری است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که پس از شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده، ۱ لیتر آب در مدت زمان ۳۸ دقیقه به دمای جوش می‌رسد. در یک مطالعه تجربی نایاک و همکاران [۲۱]، اثر مواد تغییر فاز دهنده اسید استئاریک و استانیلید را بر بازده یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم با کلکتور خورشیدی لوله خلأ مقایسه کردند. سیال عامل استفاده شده در سیستم آن‌ها آب است. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده استانیلید در اجاق خورشیدی غیرمستقیم عملکرد بهتری نسبت به اسید استئاریک در پی دارد؛ همچنین با توجه به نتایج آن‌ها، بازده اجاق خورشیدی همراه با ماده تغییر فاز دهنده استانیلید ۳۰ درصد است. تارویدی و همکاران [۲۲]، به‌صورت عددی به بررسی اثر مواد تغییر فاز دهنده مختلف بر عملکرد یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده در پژوهش آن‌ها اریتریتول، پارافین، منیزیم نیترات هگزهیدرات، منیزیم کلرید هگزهیدرات^۷ و آرتی^۸ ۱۰۰ است. آن‌ها نتیجه گرفتند که از میان مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده تنها اریتریتول می‌تواند دمای ۱۰

استامید استفاده شود؛ همچنین، بررسی آن‌ها نشان داد که دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده اثر زیادی بر زمان ذوب آن مواد ندارد.

در یک مطالعه تجربی چوداری و همکاران [۱۷]، به بررسی عملکرد یک اجاق خورشیدی سهموی همراه با ماده تغییر فاز دهنده استانیلید پرداختند. آن‌ها همچنین اثر مشکی کردن اطراف ظرف غذا (به‌منظور افزایش جذب تابش خورشید) و استفاده از محفظه شیشه‌ای (به‌منظور کاهش تلفات جابجایی) را بر عملکرد اجاق خورشیدی ارزیابی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، مشکی کردن ظرف غذا و استفاده از محفظه شیشه‌ای میزان انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده را حدود ۳۲/۳ درصد افزایش می‌دهد؛ همچنین، در پخت بعد از ظهر که با استفاده از انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده صورت گرفته است، بیشترین دمای ۲ لیتر آب نیز ۸۸/۴ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. بهیو و کیل [۱۸]، به‌صورت عددی و تجربی پخت‌وپز مواد غذایی در دمای بالا را در یک اجاق خورشیدی سهموی همراه با ماده تغییر فاز دهنده مورد پژوهش قرار دادند. ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده در مطالعه آن‌ها از نوع یوتکتیک^۱ بوده که ترکیبی از نیترات سدیم^۲ و نیترات پتاسیم^۳ با درصد مولی ۶۰:۴۰ است. آن‌ها نتیجه گرفتند که با استفاده از اجاق خورشیدی ساخته شده، ۲ کیلوگرم از ماده تغییر فاز دهنده در مدت زمان ۱۱۰ دقیقه کاملاً ذوب می‌شود؛ همچنین، ۰/۲۵ کیلوگرم سیب‌زمینی در مدت زمان ۱۷ دقیقه توسط انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده سرخ شد.

کومارسان و همکاران [۱۹] در یک مطالعه تجربی عملکرد یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده را مورد مطالعه قرار دادند. بستر آزمایشگاهی آن‌ها شامل یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی، یک مخزن ذخیره گرما شامل سیال عامل و ۱۲۶ گوی حاوی ماده تغییر فاز دهنده، واحد پخت و یک پمپ است. سیال عامل استفاده شده در پژوهش آن‌ها روغن ترمینول^۴ ۵۵ و ماده تغییر فاز

⁵ D-Mannitol

⁶ Duratherm 630

⁷ Magnesium Chloride Hexahydrate

⁸ RT100

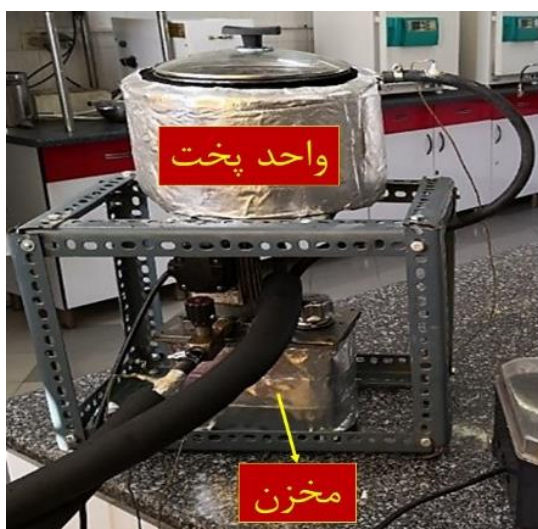
¹ Eutectic

² Sodium nitrate

³ Potassium nitrate

⁴ Therminol 55

داخل ساختمان قرار دارد. نمایی از دو واحد داخلی و خارجی اجاق خورشیدی غیرمستقیم در شکل ۱ نشان داده شده است؛ همچنین، طرح کلی بستر آزمایشگاهی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، در اجاق خورشیدی غیرمستقیم، سیال عامل توسط پمپ از مخزن به سمت کلکتور خورشیدی هدایت می‌شود. پس از جذب انرژی گرمایی در بخش کلکتور خورشیدی، سیال عامل به طرف



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمایی از دو واحد (الف) داخلی و (ب) خارجی اجاق خورشیدی غیرمستقیم

کیلوگرم آب را در مدت زمان ۳/۵ ساعت به نقطه جوش برساند؛ همچنین، استفاده از منیزیم نیترات هگزهیدرات می‌تواند دمای محفظه ماده تغییر فاز دهنده را در مدت ۱ ساعت در حدود ۱۲۸-۱۲۱ درجه سانتی‌گراد نگه دارد.

با توجه به قابلیت‌های بالای کشور ایران در زمینه بهره‌مندی از تابش خورشیدی، اجاق‌های خورشیدی یک راهکار مناسب به‌منظور تأمین انرژی پخت‌وپز در خانواده‌های ایرانی هستند. اجاق خورشیدی ارائه شده در پژوهش حاضر یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم است که امکان پخت مواد غذایی داخل ساختمان را برای یک خانواده ایرانی فراهم می‌کند. همان‌گونه که بیان شد، یکی از مشکلات اجاق‌های خورشیدی غیرمستقیم وابستگی شدید آن‌ها به حضور تابش خورشیدی است؛ بنابراین به‌منظور بهبود قابلیت اجاق خورشیدی ارائه شده، در واحد پخت اجاق از ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است که امکان پخت‌وپز را در صورت عدم حضور تابش خورشید نیز برای کاربر فراهم می‌کند. در این پژوهش، اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده به‌منظور ارزیابی امکان پخت مواد غذایی در بعد از ظهر به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی پژوهش‌های پیشین مانند مطالعه نایاک و همکاران [۲۱] و تارویدی و همکاران [۲۲] نشان می‌دهد که هر یک از مواد ذخیره کننده حرارت استانیلید و منیزیم نیترات هگزهیدرات در ساختار اجاق‌های خورشیدی غیرمستقیم مطالعه شده است. با توجه به تفاوت دمای ذوب و سایر خواص ترموفیزیکی مواد نام برده شده و اثر مستقیم آن‌ها بر فرایند پخت، مقایسه این مواد در ساختار اجاق خورشیدی غیرمستقیم حائز اهمیت است. در این مطالعه، اثر مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزهیدرات بر عملکرد اجاق خورشیدی غیرمستقیم به ازای حجم‌های مختلف آب در واحد پخت (۰/۵ و ۱ لیتر) با یکدیگر مقایسه شده است که تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته است.

۲- بستر آزمایشگاهی

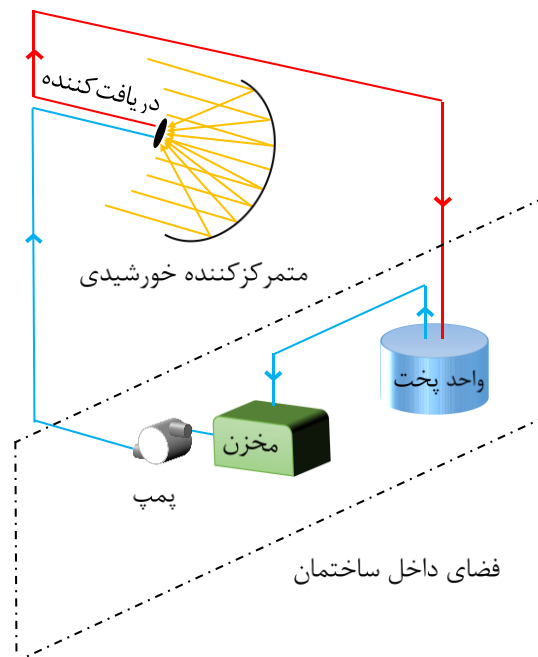
در این پژوهش، بستر آزمایشگاهی شامل کلکتور خورشیدی سهموی، واحد پخت، مخزن ذخیره کننده سیال، پمپ و لوله‌های رابط است. از این بین، کلکتور خورشیدی در خارج از ساختمان و واحد پخت، مخزن ذخیره کننده سیال و پمپ

مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵-۱۷، ۲۴]. استانیلید یک ماده تغییر فاز دهنده آلی غیرپارافینی بوده، در حالی که منیزیم نیترات هگزاهیدرات در زیرمجموعه مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی قرار می‌گیرد [۲۵]. شایان ذکر است، خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزاهیدرات در جدول ۱ درج شده است [۱۶]؛ همچنین، به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده از ۸ پره مسی در واحد پخت استفاده شده است. در انتخاب میزان مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده در ساختار اجاق خورشیدی ملاحظاتی در راستای طراحی مناسب واحد پخت و امکان پخت بعد از ظهر با استفاده از انرژی ذخیره شده در این مواد لحاظ شده است. در ساختار اجاق خورشیدی غیرمستقیم، انتقال حرارت از سیال عامل به واحد پخت توسط لوله‌های مسی مارپیچ صورت می‌گیرد که در کف و اطراف قابلمه داخلی جوش داده شده است؛ بنابراین، میزان ماده تغییر فاز دهنده در فضای بین دو محفظه استوانه‌ای شکل باید به‌گونه‌ای باشد که اطراف لوله‌های مارپیچ را پوشش دهد؛ همچنین، مقداری فضای خالی برای تغییر حجم ماده تغییر فاز دهنده در اثر تغییر فاز در فضای بین دو محفظه وجود داشته باشد. قطر داخلی لوله‌های مسی استفاده شده در واحد پخت ۶ میلی‌متر است. به‌منظور کاهش تلفات حرارت از واحد پخت اطراف محفظه بیرونی توسط عایق حرارتی کی-فلکس به ضخامت ۱۹ میلی‌متر و پشم شیشه به ضخامت ۵ سانتی‌متر پوشیده شده است.

همان‌گونه که بیان گردید، هدف از انجام این مطالعه، بررسی امکان پخت مواد غذایی در بعد از ظهر با استفاده از یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده است. در این راستا، از اجاق خورشیدی غیرمستقیم به‌منظور شارژ ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده و پخت مواد غذایی در بعد از ظهر به کمک انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده صورت می‌گیرد. از آنجا که ظرفیت



شکل ۳- نمای از داخل دریافت‌کننده حرارت



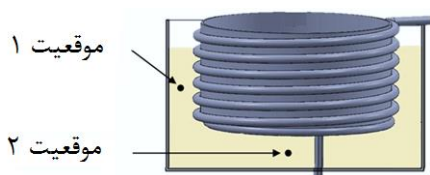
شکل ۲- طرح کلی بستر آزمایشگاهی

واحد پخت داخل ساختمان حرکت می‌کند. در این بخش، انرژی جذب شده توسط سیال عامل به واحد پخت منتقل شده و پس از آن سیال دوباره به مخزن برمی‌گردد. سیال عامل استفاده شده در این پژوهش، روغن حرارتی بهران است که خواص ترموفیزیکی آن در مطالعه لونی و همکاران [۲۳] بیان شده است؛ همچنین، دبی حجمی سیال روغن در طول آزمایش‌ها ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه است.

کلکتور خورشیدی نیز از یک متمرکز کننده خورشیدی سهموی با قطر دهانه ۱۲۰ سانتی‌متر و یک دریافت‌کننده حرارت تشکیل شده است. دریافت‌کننده حرارت شامل دو صفحه بیضی‌شکل خمیده است که به‌منظور بهبود نرخ انتقال حرارت پره‌هایی به‌صورت مارپیچ به صفحات جوش داده شده است. ضخامت و ارتفاع پره‌ها به ترتیب ۱/۵ و ۱۲ میلی‌متر است. نمایی از داخل دریافت‌کننده حرارت ساخته شده در مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. واحد پخت از دو محفظه استوانه‌ای شکل تشکیل شده است که ۲/۵ کیلوگرم از ماده تغییر فاز دهنده در فضای خالی بین دو محفظه قرار دارد. مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده در این پژوهش استانیلید و منیزیم نیترات هگزاهیدرات هستند که در مطالعات پیشین به‌منظور ذخیره‌سازی حرارت

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزا هیدرات در حالت مایع [۱۶]

ماده تغییر فاز دهنده	دمای ذوب (°C)	گرمای نهان (kJ/kg)	ظرفیت حرارتی ویژه (kJ/kgK)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	چگالی (kg/m ³)
منیزیم نیترات هگزا هیدرات	۸۹	۱۶۲/۸	۲/۵۱	۰/۴۹	۱۵۵۰
استانیلید	۱۱۸/۹	۲۲۲	۲	۰/۵	۱۰۲۰



شکل ۴- دو موقعیت اندازه‌گیری دما در ماده تغییر فاز دهنده

درج شده است. عدم قطعیت در اثر تکرار آزمایش توسط رابطه (۲) قابل تعیین است [۲۶]:

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، s انحراف معیار استاندارد^۳ و n تعداد تکرار آزمایش است. با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲)، عدم قطعیت کلی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۶]:

$$u_{tot} = \sqrt{u_{eqp}^2 + u_{rep}^2} \quad (3)$$

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده حدود ۳ درصد است؛ بنابراین، داده‌های اندازه‌گیری شده قابل اطمینان هستند.

۴- نتایج

در این بخش، امکان پخت‌وپز در بعد از ظهر به کمک انرژی ذخیره در ماده تغییر فاز دهنده موجود در واحد پخت اجاق خورشیدی غیرمستقیم بررسی می‌شود. در ابتدا به منظور بررسی امکان پخت‌وپز در بعد از ظهر، واحد پخت اجاق خورشیدی در حالت بدون بار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، عملکرد واحد پخت اجاق خورشیدی به منظور گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر به ازای مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزا هیدرات مقایسه می‌شود.

گرمایی ویژه آب از بسیاری از مواد غذایی بیشتر است [۷]؛ در این پژوهش، از انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده برای گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب استفاده شده است. آزمایش‌ها در روزهای بدون ابر در تیرماه و در مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی با عرض جغرافیای ۳۶ درجه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه انجام شده است. در طول آزمایش‌ها، متمرکز کننده خورشیدی هر ۱۰ دقیقه به سمت خورشید تنظیم شده است. اندازه‌گیری دمای روغن در ورودی و خروجی واحد پخت، دمای آب و دمای ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از دماسنج‌های نوع کی^۱ صورت گرفته شده است. شایان ذکر است، دمای ماده تغییر فاز دهنده در واحد پخت در دو موقعیت متفاوت ثبت شده است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ همچنین، دمای محیط و شدت تابش خورشید به ترتیب توسط یک دماسنج جیوه‌ای و یک پیرانومتر^۲ دیجیتال اندازه‌گیری شده است.

۳- تحلیل عدم قطعیت

در یک مطالعه تجربی، به منظور تعیین قابلیت اطمینان داده‌های اندازه‌گیری شده تحلیل عدم قطعیت ضروری است. عدم قطعیت کلی هر داده اندازه‌گیری شده به عدم قطعیت تجهیزات مورد استفاده در آزمایش و عدم قطعیت در اثر تکرار آزمایش بستگی دارد. عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری وابسته به دقت ابزار است که توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$u_{eqp} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، a نصف دقت اندازه‌گیری ابزار است. دقت اندازه‌گیری و عدم قطعیت تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۴

³ Standard Deviation

¹ K

² Pyranometer

جدول ۲- دقت و عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری

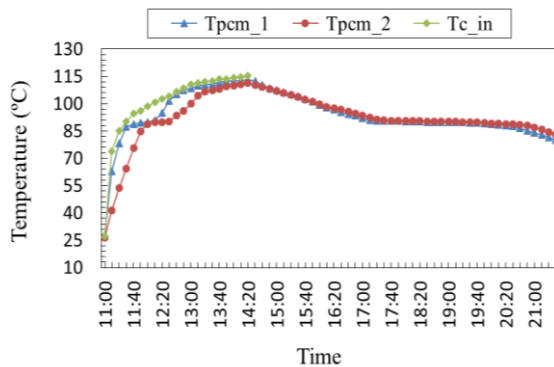
ابزار	بخش اندازه‌گیری	دقت ابزار	عدم قطعیت ابزار
پیرانومتر	تابش خورشیدی	$\pm 10 \text{ W/m}^2$	$\pm 2/89 \text{ W/m}^2$
دماسنج جیوه‌ای	دمای محیط	$\pm 0/5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0/14 \text{ }^\circ\text{C}$
دماسنج نوع کی	دمای آب، روغن و ماده ذخیره کننده حرارت	$\pm 0/5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0/14 \text{ }^\circ\text{C}$

۴-۱- بررسی واحد پخت اجاق خورشیدی در حالت بدون بار

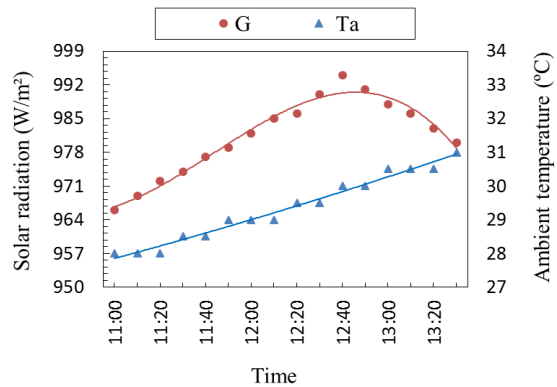
هدف از انجام این آزمایش، ارزیابی قابلیت اجاق خورشیدی غیرمستقیم به منظور شارژ کامل هر یک از مواد تغییر فاز دهنده و کارایی واحد پخت در نگهداری انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده است؛ بنابراین، آزمایش‌های انجام شده دارای دو بخش شارژ مواد تغییر فاز دهنده در طول روز و بررسی تغییرات دمای مواد تغییر فاز دهنده پس از شارژ است. آزمایش‌ها در روزهای مختلف در تیرماه و در شرایط یکسان انجام شده است. به عنوان نمونه، تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای محیط در حین فرایند شارژ ماده تغییر فاز دهنده استانیلید در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شدت تابش خورشیدی در طول روز افزایش یافته تا در ظهر خورشیدی به بیشترین مقدار خود برسد. پس از آن، شدت تابش خورشیدی دریافتی کاهش می‌یابد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که میزان کاهش تابش خورشیدی از ساعت ۱۲:۴۰ تا ۱۳:۲۰ حدود ۱۱ وات بر مترمربع (۱/۱۱ درصد) است. میانگین شدت تابش و دمای محیط در طول آزمایش به ترتیب ۹۸۱/۳۸ وات بر مترمربع و ۲۹/۳۴ درجه سانتی‌گراد است. داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش مربوط به شارژ ماده تغییر فاز دهنده منیزیم نیترات هگزا هیدرات نشان می‌دهد که میانگین تابش و دمای محیط در طول فرایند شارژ به ترتیب ۹۸۵/۱۰ وات بر مترمربع و ۲۹/۱۷ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین، آزمایش‌های صورت گرفته به منظور شارژ مواد تغییر فاز دهنده در شرایط آب و هوایی تقریباً یکسانی صورت گرفته است.

شکل ۶ تغییرات دمای ماده تغییر فاز دهنده استانیلید و سیال روغن ورودی به واحد پخت اجاق خورشیدی را در حالت بدون بار نشان می‌دهد. در حین فرایند شارژ ماده تغییر فاز

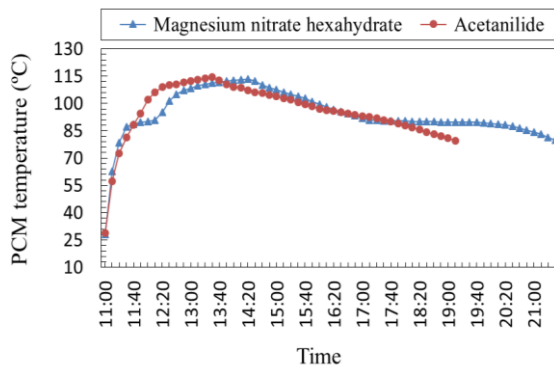
دهنده، انتقال حرارت در واحد پخت از سیال روغن به ماده تغییر فاز دهنده است؛ بنابراین همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، دمای سیال از دمای استانیلید در طول فرایند شارژ بیشتر است؛ همچنین، دمای استانیلید در موقعیت ۱ نسبت به موقعیت ۲ بالاتر است. به عنوان نمونه، دمای سیال روغن و دمای استانیلید در دو موقعیت ۱ و ۲ در ساعت ۱۱:۴۰ به ترتیب ۱۰۱/۹، ۸۸/۴ و ۶۸/۸ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس شکل ۶، دمای استانیلید و سیال روغن در ابتدا به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، ولی با گذشتن زمان تغییرات آن‌ها کم می‌شود؛ به گونه‌ای که افزایش دمای سیال ورودی به واحد پخت در مدت ۳۰ دقیقه از ساعت ۱۳ تا ۱۳:۳۰ تنها ۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که دمای استانیلید در موقعیت ۱ در ساعت ۱۳:۳۰ حدود ۱۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین، ماده تغییر فاز دهنده استانیلید در واحد پخت به دمای ذوب خود (۱۱۸/۹ درجه سانتی‌گراد) نرسیده است. در نتیجه، انرژی حرارتی تنها به صورت گرمای محسوس در استانیلید ذخیره شده و از قابلیت آن به منظور ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان استفاده نشده است. مقدار گرمای محسوس ذخیره شده در استانیلید برابر ۴۱۰/۵۰ کیلوژول است. پس از اتمام شارژ استانیلید در ساعت ۱۳:۳۰، ثبت دمای استانیلید در دو موقعیت ۱ و ۲ تا زمان رسیدن دمای استانیلید به ۸۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافته است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد، علیرغم نرسیدن استانیلید به دمای ذوب، این ماده در مدت زمان ۵ ساعت و ۴۰ دقیقه دمای بالای ۸۰ سانتی‌گراد را تجربه می‌کند که این دما از حداقل دمای موردنیاز برای پخت اکثر مواد غذایی (۷۵ درجه سانتی‌گراد [۱۳ و ۲۴]) بیشتر است؛ بنابراین، واحد پخت همراه با استانیلید می‌تواند برای پخت مواد غذایی در بعد از ظهر مورد استفاده قرار گیرد.



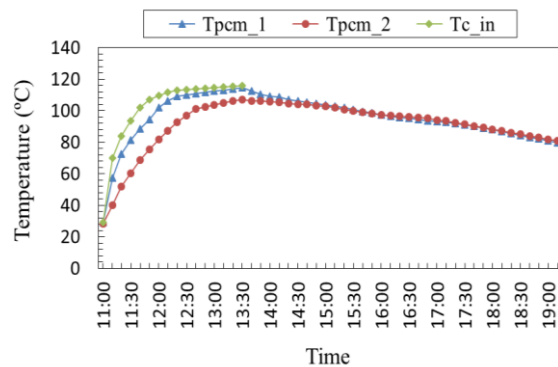
شکل ۷- تغییرات دمای منیزیم نیترات هگزا هیدرات و سیال روغن ورودی به واحد پخت در حالت بدون بار



شکل ۵- تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای محیط در حین فرایند شارژ استانیلید



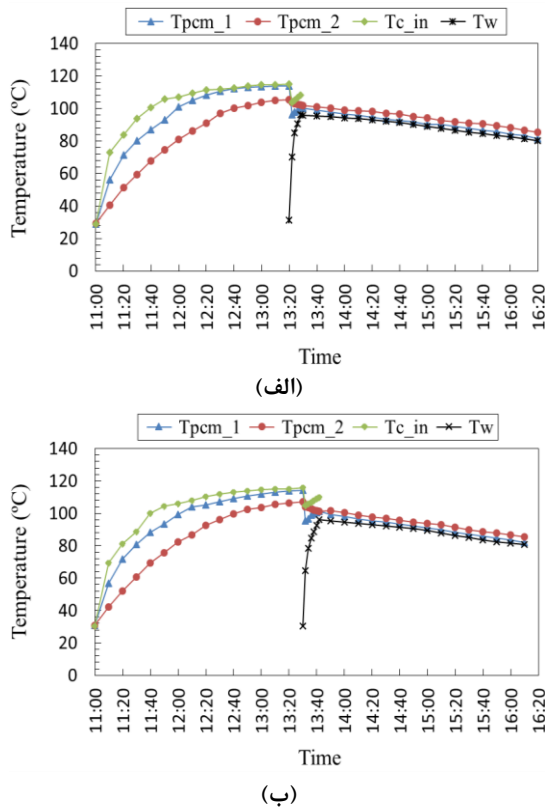
شکل ۸- تغییرات دمای منیزیم نیترات هگزا هیدرات و استانیلید در موقعیت ۱ در حالت بدون بار



شکل ۶- تغییرات دمای استانیلید و سیال روغن ورودی به واحد پخت در حالت بدون بار

موقعیت ۲ بیشتر است، ماده تغییر فاز دهنده در موقعیت ۱ زودتر ذوب می‌شود که در شکل ۷ قابل مشاهده است؛ همچنین با توجه به این شکل، دمای منیزیم نیترات هگزا هیدرات در دو موقعیت ۱ و ۲ در انتهای فرایند شارژ (ساعت ۱۴:۲۰) به ترتیب ۱۱۳/۳ و ۱۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. اندازه‌گیری دمای ماده تغییر فاز دهنده پس از فرایند شارژ نشان می‌دهد که دمای این ماده پس از گذشت تقریباً ۷ ساعت و ۱۰ دقیقه به ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد؛ بنابراین، واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات برای پخت مواد غذایی در بعد از ظهر قابل استفاده است؛ همچنین همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، به دلیل استفاده از گرمای نهان در منیزیم نیترات هگزا هیدرات، این ماده پس از فرایند شارژ مدت زمان بیشتری را در دمای بالای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به استانیلید تجربه می‌کند.

تغییرات دمای ماده تغییر فاز دهنده منیزیم نیترات هگزا هیدرات و سیال روغن ورودی به واحد پخت اجاق خورشیدی در حالت بدون بار در شکل ۷ نشان داده شده است. مشابه شکل ۶، در شکل ۷ نیز دمای منیزیم نیترات هگزا هیدرات و سیال روغن در ابتدا به میزان قابل توجهی افزایش یافته و با گذشتن زمان تغییرات آن‌ها کاهش می‌یابد؛ اما برخلاف استانیلید، در آزمایش مربوط به منیزیم نیترات هگزا هیدرات، ماده تغییر فاز دهنده در حین فرایند شارژ به دمای ذوب خود رسیده و پس از ذوب در دمای ۸۹ درجه سانتی‌گراد فرایند شارژ ادامه یافته تا علاوه بر گرمای نهان انرژی بیشتری به صورت گرمای محسوس در این ماده ذخیره شود. مقدار انرژی حرارتی ذخیره شده در منیزیم نیترات هگزا هیدرات برابر ۸۳۷/۵۷ کیلوژول است. از آنجا که افزایش دمای منیزیم نیترات هگزا هیدرات در موقعیت ۱ نسبت به



شکل ۹- تغییرات دمای آب، استانیلید و سیال روغن ورودی به واحد پخت به ازای بار الف) ۰/۵ لیتر و ب) ۱ لیتر در پخت بعد از ظهر

مشخص توسط رابطه $\dot{E} = \frac{mC(T_f - T_i)}{\Delta t}$ تعیین می‌شود که در آن m جرم آب، C ظرفیت گرمایی ویژه آب و Δt بازه زمانی است؛ همچنین، T_f و T_i به ترتیب دمای اولیه و نهایی آب در بازه زمانی هستند. شایان ذکر است، تغییرات دمای آب در پخت بعد از ظهر از زمان بارگذاری تا جوشش هر دو دقیقه ثبت شده است؛ همچنین در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب، نرخ انرژی دریافتی توسط آب در هر بازه زمانی در انتهای آن بازه نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه در شکل ۱۰-الف، توان حرارتی ۲۵۱/۷۴ وات که در ساعت ۱۳:۲۴ نشان داده شده در حقیقت نرخ انرژی دریافتی توسط آب از ساعت ۱۳:۲۲ تا ۱۳:۲۴ است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به اختلاف دمای بالای آب با ماده تغییر فاز دهنده و سیال روغن در شروع پخت بعد از ظهر، تغییر دمای آب در بازه زمانی ابتدایی زیاد است؛ ولی با گذشت زمان و نزدیک شدن به نقطه جوش، اختلاف دمای آب در هر بازه زمانی کاهش

۴-۲- بررسی واحد پخت اجاق خورشیدی در پخت بعد از ظهر

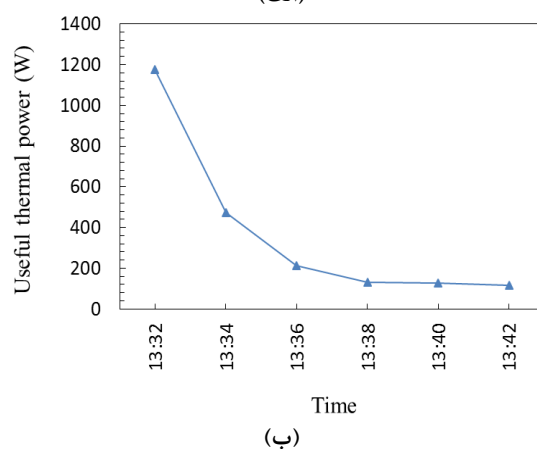
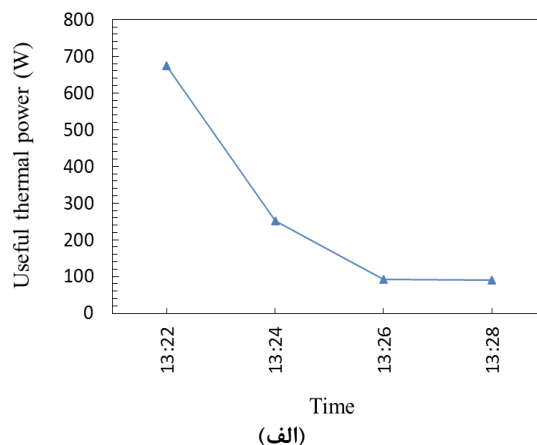
در این بخش، اثر مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نترات هگزا هیدرات بر عملکرد واحد پخت اجاق خورشیدی غیرمستقیم در پخت بعد از ظهر مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، پس از شارژ مواد تغییر فاز دهنده از انرژی ذخیره شده در این مواد برای به جوش آوردن و سپس گرم نگه‌داشتن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر استفاده شده است. در طول آزمایش‌ها، پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل دمای سیال روغن ورودی به واحد پخت در حین فرایند شارژ مواد تغییر فاز دهنده، دمای سیال آب در پخت بعد از ظهر و دمای مواد تغییر فاز دهنده در طول فرایند شارژ و پخت بعد از ظهر هستند.

۴-۲-۱- واحد پخت همراه با استانیلید

شکل‌های ۹-الف و ۹-ب تغییرات دمای آب، استانیلید و سیال روغن ورودی به واحد پخت را در آزمایش‌های مربوط به گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در آزمایش‌های مربوط به پخت بعد از ظهر، سیال آب پس از شارژ ماده تغییر فاز دهنده به درون قابلمه داخلی واحد پخت بارگذاری می‌شود؛ همچنین، انتقال حرارت از سیال روغن به واحد پخت تا زمان رسیدن آب به دمای جوش ادامه می‌یابد و پس از آن پمپ خاموش شده و جریان سیال روغن متوقف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در پخت بعد از ظهر، دمای ۰/۵ و ۱ لیتر آب به ترتیب در مدت زمان ۸ و ۱۲ دقیقه به نقطه جوش می‌رسد. در این آزمایش‌ها همچنین ثبت دمای آب و ماده تغییر فاز دهنده تا رسیدن دمای آب به ۸۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد. با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، دمای ۰/۵ لیتر آب پس از گذشت حدود ۲ ساعت و ۵۲ دقیقه از نقطه جوش به ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد؛ در حالی که این زمان برای آزمایش ۱ لیتر آب حدود ۲ ساعت و ۲۸ دقیقه است.

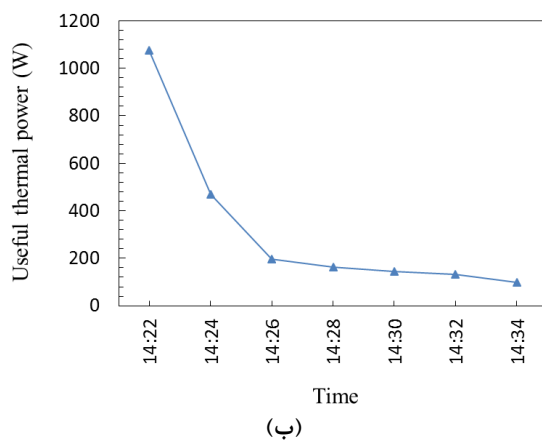
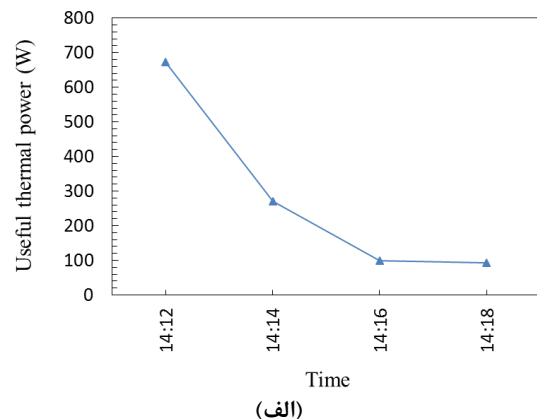
شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب تغییرات نرخ انرژی دریافتی توسط آب در واحد پخت همراه با ماده استانیلید را در مدت زمان به جوش آوردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر نشان می‌دهد. نرخ انرژی دریافتی توسط آب در یک بازه زمانی

۴-۲-۲- واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات تغییرات دمای آب، منیزیم نیترات هگزا هیدرات و سیال روغن ورودی به واحد پخت در آزمایش‌های مربوط به گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان داده شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات، مدت زمان لازم برای به جوش آوردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر تقریباً مشابه با واحد پخت همراه با استانیلید است. در واقع اثر مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزا هیدرات بر تغییرات دمای آب پس از رسیدن به نقطه جوش به خوبی قابل مقایسه است. همان‌گونه که بیان گردید، منیزیم نیترات هگزا هیدرات در طول فرایند شارژ به نقطه ذوب خود رسیده و انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان و محسوس در آن ذخیره می‌شود؛ این در حالی است که انرژی حرارتی ذخیره شده در استانیلید تنها به صورت گرمای محسوس است؛ بنابراین، واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات می‌تواند آب را برای مدت زمان بیشتری در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگه دارد. با توجه به شکل ۱۱-الف، دمای ۰/۵ لیتر آب در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات پس از رسیدن به نقطه جوش طی مدت ۴ ساعت و ۴۲ دقیقه به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که حدود ۱ ساعت و ۵۰ دقیقه بیشتر از زمان متناظر در واحد پخت همراه با استانیلید است؛ همچنین همان‌گونه که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود، مدت زمان سپری شده برای تغییر دمای ۱ لیتر آب از نقطه جوش تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات نسبت به واحد پخت همراه با استانیلید حدود ۱ ساعت بیشتر است. شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب تغییرات نرخ انرژی دریافتی توسط آب در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات را در طی به جوش آوردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، روند تغییرات میزان انرژی دریافتی توسط آب در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات تقریباً مشابه با واحد پخت همراه با استانیلید است؛ همچنین مقایسه شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب نشان می‌دهد که میانگین نرخ انرژی دریافتی توسط آب از زمان بارگذاری آب تا جوشش در آزمایش ۱ لیتر آب نسبت به آزمایش ۰/۵ لیتر آب حدود ۴۱/۵۶ وات بیشتر است.



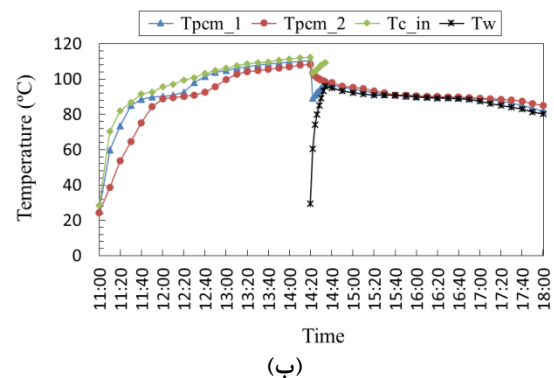
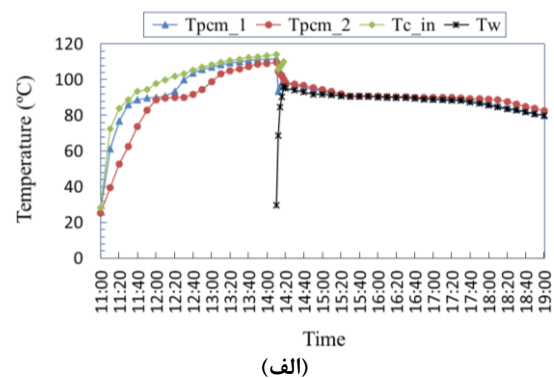
شکل ۱۰- تغییرات نرخ انرژی دریافتی توسط آب در واحد پخت همراه با استانیلید به ازای بار (الف) ۰/۵ لیتر و (ب) ۱ لیتر در پخت بعد از ظهر

می‌یابد؛ بنابراین با توجه به رابطه بیان شده، نرخ انرژی دریافتی توسط آب در هر بازه زمانی با گذشت زمان کم می‌شود. به‌عنوان نمونه در آزمایش مربوط به جوش آوردن ۰/۵ لیتر آب، تغییر دمای آب در ۲ دقیقه ابتدایی و انتهایی (قبل جوشش) به ترتیب ۳۹/۲ و ۵/۴ درجه سانتی‌گراد و مقادیر متناظر برای نرخ انرژی دریافتی توسط آب به ترتیب ۶۷۴/۹۴ و ۹۱/۰۱ وات است. مقایسه شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان می‌دهد که میزان انرژی دریافتی توسط آب در هر بازه زمانی در آزمایش مربوط به جوش آوردن ۱ لیتر آب نسبت به ۰/۵ لیتر آب بیشتر است. بر اساس نتایج، میانگین نرخ انرژی دریافتی توسط آب از زمان بارگذاری آب تا جوشش برای آزمایش ۰/۵ و ۱ لیتر آب به ترتیب ۲۷۷/۶۸ و ۳۷۳/۶۸ وات است.



شکل ۱۲- تغییرات نرخ انرژی دریافتی توسط آب در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات به ازای بار (الف) ۰/۵ لیتر و (ب) ۱ لیتر در پخت بعد از ظهر

- با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، دمای ۰/۵ و ۱ لیتر آب در بعد از ظهر پس از گذشت تقریباً ۸ و ۱۲ دقیقه به نقطه جوش می‌رسد.
- به دلیل استفاده از گرمای نهان ذخیره شده در منیزیم نیترات هگزا هیدرات، مدت زمان سپری شده برای تغییر دمای آب از نقطه جوش تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در واحد پخت همراه با این ماده در آزمایش ۰/۵ لیتر آب حدود ۱ ساعت و ۵۰ دقیقه و در آزمایش ۱ لیتر آب حدود ۱ ساعت از زمان‌های متناظر در واحد پخت همراه با استانیلید بیشتر است.
- دمای ۰/۵ لیتر آب در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات پس از رسیدن به نقطه جوش طی مدت ۴ ساعت و ۴۲ دقیقه به دمای ۸۰ درجه



شکل ۱۱- تغییرات دمای آب، منیزیم نیترات هگزا هیدرات و سیال روغن ورودی به واحد پخت به ازای بار (الف) ۰/۵ لیتر و (ب) ۱ لیتر در پخت بعد از ظهر

۵- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، امکان پخت مواد غذایی در بعد از ظهر با استفاده از یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده است؛ همچنین، عملکرد واحد پخت به ازای گرم کردن ۰/۵ و ۱ لیتر آب به کمک انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده استانیلید و منیزیم نیترات هگزا هیدرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان می‌شوند:
- در طول فرایند شارژ، منیزیم نیترات هگزا هیدرات به نقطه ذوب خود رسیده و انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان و محسوس در آن ذخیره می‌شود؛ این در حالی است که انرژی حرارتی ذخیره شده در استانیلید تنها به صورت گرمای محسوس است؛ همچنین، علیرغم نرسیدن استانیلید به دمای ذوب، واحد پخت همراه با این ماده توانایی پخت مواد غذایی در بعد از ظهر را دارد.

- [8] Chaudhary R, Yadav A (2020) Experimental investigation of a solar cooking system inhibiting closed airtight cooking pot and evacuated tube collector for the preparation of Indian cuisine items. *Environ Dev Sustain* 1(1): 1-23.
- [9] 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: 416-426.
- [10] 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.
- [11] Lecuona A, Nogueira J-I, Ventas R, Rodríguez-Hidalgo M-C, Legrand M (2013) Solar cooker of the portable parabolic type incorporating heat storage based on PCM. *Appl Energy* 111: 1136-1146.
- [12] Aramesh M, Ghalebani M, Kasaeian A, Zamani H, Lorenzini G, Mahian O, Wongwises S (2019) A review of recent advances in solar cooking technology. *Renew Energy* 140: 419-435.
- [13] Domanski R, El-Sebaï AA, Jaworski M (1995) Cooking during off-sunshine hours using PCMs as storage media. *Energy* 20(7): 607-616.
- [14] Coccia G, Aquilanti A, Tomassetti S, Comodi G, Di Nicola G (2020) Design, realization, and tests of a portable solar box cooker coupled with an erythritol-based PCM thermal energy storage. *Sol Energy* 201: 530-540.
- [15] Buddhi D, Sharma SD, Sharma A (2003) Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors. *Energy Convers Manag* 44(6): 809-817.
- [16] Chen CR, Sharma A, Tyagi SK, Buddhi D (2008) Numerical heat transfer studies of PCMs used in a box-type solar cooker. *Renew Energy* 33(5): 1121-1129.
- [17] Chaudhary A, Kumar A, Yadav A (2013) Experimental investigation of a solar cooker based on parabolic dish collector with phase change thermal storage unit in Indian climatic conditions. *J Renew Sustain Energy* 5(2): 023107.
- [18] Bhavé AG, Kale CK (2020) Development of a thermal storage type solar cooker for high temperature cooking using solar salt. *Sol Energy Mater Sol Cells* 208: 110394.
- [19] Kumaresan G, Vigneswaran VS, Esakkimuthu S, Velraj R (2016) Performance assessment of a solar domestic cooking unit integrated with thermal energy storage system. *J Energy Storage* 6: 70-79.
- [20] Mussard M, Nydal OJ (2013) Charging of a heat storage coupled with a low-cost small-scale solar

سانتیگراد می‌رسد که این حالت طولانی‌ترین زمان را در بین حالت‌های مختلف بررسی شده دارا است.

- در واحد پخت همراه با هر یک از مواد تغییر فاز دهنده، تغییر دمای آب در بازه زمانی ابتدایی پس از بارگذاری زیاد است؛ ولی با گذشت زمان و نزدیک شدن به نقطه جوش، اختلاف دمای آب و نرخ انرژی دریافتی توسط آب در هر بازه زمانی کاهش می‌یابد؛ همچنین در واحد پخت همراه با منیزیم نیترات هگزا هیدرات، میانگین نرخ انرژی دریافتی توسط آب در آزمایش مربوط به جوش آوردن ۱ لیتر آب نسبت به آزمایش ۰/۵ لیتر آب حدود ۴۱/۵۶ وات بیشتر است.

۶- مراجع

- [1] Senthil R (2021) Enhancement of productivity of parabolic dish solar cooker using integrated phase change material. *Mater Today Proc* 34: 386-388.
- [2] Khan MM, Iqbal SM, Ravi NT, Pesala B (2020) Design and development of an optical system for obtaining fixed orientation of concentrated sunlight for indoor applications. *Sol Energy* 204: 515-529.
- [3] Coccia G, Di Nicola G, Pierantozzi M, Tomassetti S, Aquilanti A (2017) Design, manufacturing, and test of a high concentration ratio solar box cooker with multiple reflectors. *Sol Energy* 155: 781-792.
- [4] Weldu A, Zhao L, Deng S, Mulugeta N, Zhang Y, Nie X, Xu W (2019) Performance evaluation on solar box cooker with reflector tracking at optimal angle under Bahir Dar climate. *Sol Energy* 180: 664-677.
- [5] Sagade AA, Samdarshi SK, Lahkar PJ, Sagade NA (2020) Experimental determination of the thermal performance of a solar box cooker with a modified cooking pot. *Renew Energy* 150: 1001-1009.
- [6] Hosseinzadeh M, Faezian A, Mirzababae SM, Zamani H (2020) Parametric analysis and optimization of a portable evacuated tube solar cooker. *Energy* 194: 116816.
- [7] 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 from Energy and Exergy Viewpoints. *Modares Mech Eng* 20(6): 1525-1532.

- [24] Hussein HMS, El-Ghetany HH, Nada SA (2008) Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit. *Energy Convers Manag* 49(8): 2237-2246.
- [25] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D (2009) Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 13: 318-345.
- [26] Farzanehnia A, Khatibi M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M (2019) Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management. *Energy Convers Manag* 179: 314-325.
- parabolic trough for cooking purposes. *Sol Energy* 95: 144-154.
- [21] Nayak N, Abu Jarir H, Al Ghassani H (2016) Solar Cooker Study under Oman Conditions for Late Evening Cooking Using Stearic Acid and Acetanilide as PCM Materials. *J Sol Energy* 2305875.
- [22] Tarwidi D, Murdiansyah DT, Ginanjar N (2016) Performance evaluation of various phase change materials for thermal energy storage of a solar cooker via numerical simulation. *Int J Renew Energy Dev* 5(3): 199-210.
- [23] Loni R, Asli-Ardeh EA, Ghobadian B, Bellos E, Le Roux WG (2018) Numerical comparison of a solar dish concentrator with different cavity receivers and working fluids. *J Clean Prod* 198: 1013-1030.