



طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی پخت نان با متمرکز کننده

حسین خراسانی زاده^{۱*}، مجید سبزوoshانی^۱، سعید نظری^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، صندوق پستی ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷، khorasan@kashanu.ac.ir

چکیده- در این تحقیق طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی پخت نان برای شرایط تشعشع خورشیدی در شهر کاشان انجام گرفته است. در مرحله طراحی و به قصد تأمین انرژی لازم برای پخت نان نازک به قطر ۴۵ سانتی متر با استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی، یک سطح سهموی شکل انعکاسی با استفاده از چیدمانی از آینه ها برای متمرکز نمودن تشعشع به زیر یک صفحه پخت آلومینیومی به قطر ۴۸ سانتی متر و ضخامت ۶ میلی متر در نظر گرفته شد و قطر سطح انعکاسی ۱۳۰ سانتی متر محاسبه شد. با توجه به تغییر مکان خورشید در آسمان در طول سال و در ساعات روز، سطح انعکاسی از سه درجه آزادی برای تنظیم شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و امکان جابجایی در راستای عمودی برخوردار شد. عملکرد اجاق در چند روز مختلف در تابستان ۱۳۹۱ بررسی و با آن پخت نان صورت گرفت. بررسی عملکرد و نتایج اندازه گیری ها صحت محاسبات را تأیید نمود و بازده کلی اجاق را حدود ۵۰٪ نشان داد. با این اجاق می توان 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 پخت نمود؛ همچنین از آن برای پخت سایر مواد غذایی بهره برد.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، اجاق خورشیدی، پخت نان، سطح انعکاسی.

Design, manufacture and testing a solar bread cooker with concentrator

H. Khorasanizadeh^{1*}, M. Sabzpooshani¹, S. Nazari²

1- Assist. Prof., Faculty of Mech. Eng. & Energy Research Inst., Kashan Univ., Kashan, Iran

2- MSc, Faculty of Mech. Eng., Kashan Uni., Kashan, Iran

* P.O.B. 87317-51167, Kashan, Iran. khorasan@kashanu.ac.ir

Abstract- In this study design, construction and test of a solar bread cooker has been undertaken for solar radiation status in Kashan. In design step and in order to produce the required energy, use of a parabolic reflective surface for concentrating the solar flux on the back of a cooking plate was considered. For cooking thin bread with 45 cm diameter the diameter of the reflective surface was calculated 130 cm and the cooking plate diameter and thickness were considered 48 cm and 6 mm, respectively. Since the sun orientation changes with time the reflective surface became capable of being adjusted around a north-south as well as east-west axes; also it may be moved vertically up or down. For evaluating the performance, tests and measurements were performed on different days of summer, 1391. The results indicated the validity of calculations and showed the overall efficiency of the solar bread cooker is around 50%. With the solar cooker it is possible to cook 12 beards per hour each with 200 gr weight of dough in eight months of the year at least for six hours in every sunny day; also it may be used for cooking other foods.

Keywords: Solar Energy, Solar Cooker, Bread Cooking, Reflective Surface.

۱- مقدمه

امروزه جوامع صنعتی و شهرهای بزرگ با مشکل آلودگی محیط زیست مواجه هستند و اثرات مخرب آلودگی‌ها در زمین، آب و هوا آشکار شده است. پایین آوردن میزان مصرف انرژی‌های فسیلی و جایگزینی آن‌ها با انرژی‌های پاک راه حل‌هایی برای کاهش آلودگی‌ها هستند. این موضوع بر اهمیت سیاست‌گذاری‌ها و انجام مطالعات برای استفاده از منابع و پتانسیل‌های محلی تأکید دارد [۲،۱]. استفاده از انرژی خورشید، به عنوان یک منبع تمام نشدنی و سرآغاز حیات و منشاء تمام انرژی‌های دیگر، می‌تواند پاسخ به بخشی از تقاضای انرژی در آینده باشد. در حال حاضر انرژی تولید شده از تشعشع خورشیدی فقط کمتر از ۰/۰۱ درصد از تقاضای انرژی در جهان است [۳].

استفاده از اجاق‌های خورشیدی به دلایل مختلفی از جمله جلوگیری از آلودگی محیط زیست، کاهش مصرف انرژی برق و سوخت‌های فسیلی، صرفه اقتصادی بلند مدت و پخت مغذی مواد به علت پخت آرام جذاب است. عمده‌تأ این اجاق‌ها انرژی خورشیدی را جذب کرده و گرما را در داخل یک محفظه بسته، که ظروف غذا داخل آن قرار می‌گیرد، برای پخت انواع غذاها به دام می‌اندازند. در اجاق‌های خورشیدی دمای داخل محفظه تا 200°C هم می‌رسد [۴]. اجاق‌های پخت خورشیدی به دو دسته کلی بدون منبع ذخیره گرما و همراه با منبع ذخیره گرما تقسیم می‌شوند. اجاق‌های بدون منبع ذخیره گرما، متناسب با نوع فرایند انتقال گرما به ظرف پخت غذا، به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در حالت مستقیم انرژی تشعشعی خورشید به طور مستقیم درعمل پخت غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجاق‌های جعبه‌ای و اجاق‌های تمرکزگرا از این دسته از اجاق‌ها هستند. در اجاق‌های نوع غیرمستقیم از یک سیال انتقال دهنده گرما برای انتقال حرارت از کلکتور به صفحه پخت استفاده می‌شود.

روی اجاق‌های جعبه‌ای پوشش شیشه‌ای (معمولاً دو پوشش) قرار می‌گیرد و برای افزایش بازده جداره‌های داخلی اجاق توسط آینه‌ها پوشش داده می‌شود تا تشعشع منعکس شده بیشتری به سطوح ظروف غذای داخل محفظه برسد [۵]. تاکنون ۹۵ مدل مختلف از این اجاق‌ها را سازمان توسعه اجاق‌های خورشیدی به نام خود ثبت نموده است. مزیت

اجاق‌های جعبه‌ای خورشیدی سادگی کار با آن‌ها و استفاده از حداقل تجهیزات لازم در طول پخت می‌باشد.

تیواری و یاداو در سال ۱۹۸۶ [۶] و گراپ و همکاران در سال ۱۹۹۱ [۷] دو نوع اجاق جعبه‌ای خورشیدی معمولی را طراحی و ساختند. مزیت مهم این اجاق‌ها نسبت اجاق‌های قدیمی‌تر وجود صفحه جذب در داخل محفظه اجاق و نیز قرار گرفتن ظرف پخت روی این صفحه به منظور افزایش انتقال حرارت و بازده بود. تولاسی‌داس و همکاران [۹،۸] نقش اجزای مختلف اجاق‌های جعبه‌ای خورشیدی مانند ضخامت صفحه، تعداد ظرف‌های مورد استفاده، رنگ‌های سیاه روی ظروف پخت و اثر بازتابنده‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با سیاه کردن صفحه جذب و افزودن بازتابنده‌ها انتقال گرمای همرفتی و تشعشعی افزایش می‌یابد. تابور مطالعاتی را در خصوص اضافه کردن صفحات آینه‌ای در بیرون محفظه پخت اجاق به عنوان بازتابنده‌های بیرونی و نیز اضافه کردن آینه‌هایی در جداره داخلی محفظه اجاق انجام داد و نشان داد که مقدار تشعشع رسیده به سطح پخت اجاق افزایش می‌یابد [۱۰]. آمر طراحی جدید از اجاق خورشیدی را معرفی کرد که صفحه جذب آن از بالا و پایین در معرض تابش خورشید قرار می‌گرفت [۱۱]. او با انجام آزمایش نشان داد که زمان پخت در این اجاق به اندازه ۳۰ تا ۶۰ دقیقه نسبت به اجاق معمولی کاهش می‌یابد. مواد مرسوم مورد استفاده در صفحات جذب مس، آلومینیوم و فولاد هستند که باید با رنگ سیاه رنگ شوند یا روکش آن‌ها باید از مواد منتخب باشد. ردی و ناراسیمها بر اساس مطالعاتی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین قسمت یک اجاق صفحه جذب آن است [۱۲] و اقداماتی برای بهبود عملکرد این صفحه اجاق انجام دادند.

دسته دیگری از اجاق‌ها، اجاق‌های با متمرکزکننده هستند که از نظر دریافت تشعشع به دسته‌ای که تشعشع را از بالا و دسته دیگری که تشعشع را از پایین متمرکز می‌کنند تقسیم می‌شوند [۱۳]. در این اجاق‌ها ظرف پخت در فاصله کانونی متمرکز کننده آینه‌ای قرار می‌گیرد. تاکنون ۵۱ مدل از این اجاق‌ها توسط سازمان سازمان توسعه اجاق‌های خورشیدی به ثبت رسیده است.

ناراسیمها و سویرامانیام نیز اجاق خود را به صورت تمرکزگرا طراحی نمودند و ظروف را به حالت آویزان در نقطه کانونی

با توجه به صرفه جویی اقتصادی ناشی از استفاده از انرژی خورشیدی و اهمیت نان در رژیم غذایی و مزایای پخت نان مطابق سلیقه مصرف کننده، در این تحقیق به طراحی و ساخت یک اجاق پخت نان در مقیاس خانگی با استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی پرداخته شده است و عملکرد آن ارزیابی شده است.

۲- طراحی مفهومی

در تنورهای صنعتی و معمولی مربوط به پخت نان حجیم یا مسطح، علاوه بر انتقال حرارت هدایتی به صورت جابجایی نیز به خمیر در حال پخت انتقال حرارت صورت می گیرد و جریان هوای گرم موجب پخت رویه نان نیز می شود. برای پخت نان با استفاده از انرژی خورشیدی باید از یک صفحه که با دریافت تشعشع خورشیدی گرم می شود استفاده کرد و لذا جریان هوای داغ روی سطح بالایی خمیر وجود نخواهد داشت. این روش پخت بسیار مشابه پخت نان ساج در مناطقی از ایران می باشد که یک صفحه فلزی به طور مستقیم روی شعله قرار می گیرد و خمیر پهن شده روی سطح داغ آن قرار داده می شود. به همین دلیل برای پخت سطح بالایی خمیر، لازم به برگرداندن آن روی صفحه پخت می باشد. از طرف دیگر شار تشعشع خورشیدی کم است و نمی تواند انرژی لازم برای پخت نان را تأمین کند؛ لذا باید از مجموعه ای با سطحی بزرگ برای دریافت و سپس بازتاب نمودن تشعشع خورشیدی به صفحه ای کوچک تر استفاده شود. به همین دلیل در اولین قدم از طراحی مفهومی، استفاده از متمرکزکننده سهموی در نظر گرفته شد. با انجام اندازه گیری میدانی در چندین نانوایی لواش مشخص شد که دمای صفحه پخت قبل از پهن نمودن خمیر حدود 180°C تا 190°C و دمای این صفحه درست بعد از برداشتن نان حدود 160°C بود. لذا در طرح دستگاه این که دمای صفحه پخت به حداقل 180°C برسد به عنوان یک اصل در نظر گرفته شد. همچنین در مرحله طراحی مفهومی لازم دیده شد که سطح انعکاسی با حرکت روزانه و فصلی خورشید قابل تنظیم باشد؛ به گونه ای که حتی المقدور جهت تشعشع مستقیم خورشیدی با عمود بر مرکز انحناء سهموی آن هم راستا باشد. همچنین موارد زیر در نظر گرفته شدند: ۱- اجاق توانایی حداکثر ساعات پخت روزانه در اکثر ماه های سال را داشته باشد. ۲- به دلیل قرارگیری در

متمرکزکننده قرار دادند. آن ها اعلام نمودند که اگر گردش هوای داغ از روی سطح و زیر ظرف بتواند انجام گیرد، انتقال گرمای همرفتی را زیاد و زمان پخت را کاهش خواهد داد [۱۴]. خلیفه و همکاران در اجاق با متمرکزکننده خود روی ظروف پخت پی رکسی یک روکش آلومینومی سیاه قرار دادند. آن ها تنظیم تمرکز کانونی اجاق را به طور دستی هر ۱۵ تا ۲۰ دقیقه یکبار انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که روکش آلومینومی سیاه تا حد زیادی جذب تشعشع خورشیدی را بالا برده و در نتیجه بازده اجاق را افزایش می دهد [۱۵].

در اجاق های نوع غیرمستقیم، ظرف غذا از کلکتور فاصله دارد و لذا در آن ها به یک واسطه انتقال گرما به ظرف پخت نیاز است. در اجاق های غیرمستقیم از کلکتورهای صفحه تخت استفاده می شود و سیال گرم شده در کلکتور معمولاً به صورت ترموسیفونی به صفحه پخت انتقال داده می شود [۴]. ذخیره کننده های انرژی گرمایی در هر جایی که تناسبی بین مصرف و تولید انرژی وجود نداشته باشد، بسیار ضروری می باشند. اگر اجاق خورشیدی شامل ماده ذخیره کننده گرما باشد می توان از آن در روزهای ابری یا ساعات غیر آفتابی روز هم استفاده کرد [۱۶].

در ایران با بهره مندی از ۱۹۵۰ تا ۲۲۰۰ ساعت آفتابی در طول ۲۸۰ روز از سال می توان با یک برنامه منظم، استفاده از اجاق های خورشیدی برای پخت غذا و نان را در مناطق عشایری و روستایی و حتی شهری مطرح و گسترش داد. علاوه بر اهمیت این موضوع از دیدگاه مصرف انرژی، با توجه به سابقه دیرین پخت نان بصورت خانگی و مطابق ذائقه محلی در مناطق مختلف ایران، عرضه اجاق خورشیدی پخت نان در مقیاس خانگی برای مردم جاذبه دارد. با این وجود بررسی انجام شده هیچ سابقه ای از کار علمی را در زمینه ساخت اجاق خورشیدی پخت نان در ایران نشان نداد.

نان مهم ترین منبع غذایی در تغذیه انسان و تأمین کننده قسمت عمده کالری و پروتئین و ویتامین های گروه B است و از نظر تأمین مواد معدنی لازم نیز دارای اهمیت می باشد. پخت نان یکی از مهم ترین مراحل است و شرایط مختلف تنور یا فر پخت نان از نظر دما، زمان پخت و رطوبت در کیفیت نان پخته شده تأثیر دارند؛ از جمله دمای مناسب پخت یکی از عوامل مؤثر در تازه ماندن نان پخته شده می باشد.

که در بخش‌های بعد می‌آید از این حد از تشعشع به عنوان یک معیار استفاده شده است و چنانچه از جدول ۱ دیده می‌شود به جز ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن می‌توان در بقیه ماه‌های سال در محدوده ساعات ۹ تا ۳ بعدازظهر پخت نان انجام داد.

۳-۲- محاسبات مربوط به تأمین انرژی لازم برای پخت

در این تحقیق پخت نان لواش نازک به قطر ۴۵ سانتی‌متر و چانه خمیر حدود ۲۰۰ گرم موردنظر قرار گرفت. چگالی خمیر به صورت تجربی در آزمایشگاه فیزیک پایه دانشکده علوم دانشگاه کاشان اندازه‌گیری و ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. در حین پخت ابتدا دمای خمیر از حدود ۲۸ °C (دمای اولیه چانه خمیر) به حدود ۹۵ °C (با توجه به فشار محلی هوای محیط) می‌رسد. انتقال حرارت بیشتر باعث تبخیر آب موجود در خمیر و تکمیل پخت آن می‌شود.

با فرض این که ظرفیت گرمایی ویژه خمیر حدود ۰.۹۲٪ آب باشد، گرمای لازم برای افزایش دمای خمیر از ۲۸ به ۹۵ °C بر واحد جرم آن عبارتست از:

$$q_1 = c_{\text{Dough}} \Delta T = 3.85 \times (95 - 28) = 258 \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right) \quad (1)$$

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در نانوائی‌ها مشخص شد که در زمان پخت حدود ۱۰٪ از وزن خمیر به صورت بخار آب از دست می‌رود. لذا مقدار انرژی لازم برای تبخیر آب بر واحد جرم خمیر برابر است با:

$$q_2 = m \times h_{\text{fg}} = 0.1 \times 2260 = 226 \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right) \quad (2)$$

لذا انرژی لازم کل بر واحد جرم خمیر عبارتست از:

$$q_{\text{tot}} = q_1 + q_2 = 258 + 226 = 484 \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right) \quad (3)$$

در نتیجه به ۹۶۸۰۰ J انرژی برای پخت یک چانه خمیر ۲۰۰ گرمی نیاز است. با فرض این که زمان پخت ۳ دقیقه و ضخامت خمیر ۰/۱ سانتی‌متر باشد، انرژی مورد نیاز برای پخت نان بر واحد سطح آن برابر است با:

$$e = t_{\text{Dough}} \times \rho_{\text{Dough}} \times q_{\text{tot}} = 0.1(\text{cm}) \times 1.2 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) \times 484 \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right) = 58 \left(\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right) \quad (4)$$

محیط آزاد، سازه‌ی آن محکم و قوی باشد و همچنین استفاده، تعمیر و نگهداری آن توسط افراد غیرمتخصص امکان‌پذیر باشد. ۳- اجاق ارزان قیمت و از مواد در دسترس ساخته شود. ۴- طراحی به صورتی باشد که اجاق باعث ایجاد آتش‌سوزی و یا سوختگی افراد مرتبط نشود.

۳- طراحی کاربردی، ساخت و مونتاژ

برای انجام محاسبات و برآوردهای مربوط به طراحی هر سیستم خورشیدی و برای تعیین ابعاد و اندازه‌های اجزای آن، اطلاع از میزان تشعشع خورشیدی در دسترس لازم است. در بخش اول از این قسمت این موضوع شرح داده می‌شود و سپس در بخش‌های بعدی محاسبات مربوط به انرژی لازم پخت، طراحی اجزاء و افت‌های اجاق ارائه می‌شوند.

۳-۱- بررسی شرایط تشعشع

با توجه به طراحی اجاق برای شرایط تشعشعی شهر کاشان، و از آنجا که اطلاعات خورشیدی اندازه‌گیری شده برای کاشان وجود ندارد، از نتایج اندازه‌گیری شار تشعشع کل ورودی به سطح افقی در ساعت‌های مختلف از روز متوسط هر ماه، I ، در ایستگاه مورچه‌خورت استفاده شد [۱۷]. شهر مورچه‌خورت شرایط تشعشعی و آب و هوایی مشابهی با کاشان دارد و در نزدیکی آن واقع است. مقدار مؤلفه‌های مختلف تشعشع ورودی به یک سطح شیب‌دار متفاوت از مؤلفه‌های تشعشع ورودی به سطح افقی است و علاوه بر شیب سطح به زمان و زوایای مختلف خورشیدی وابسته است. در این تحقیق روابط ارائه شده در [۱۸] به کار گرفته شدند و با استفاده از شار تشعشعی کل ورودی به سطح افقی، شار تشعشع مستقیم ورودی به سطح عمود بر راستای تشعشع مستقیم (I_{bn})، شار تشعشع پخش شده ورودی به سطح عمود بر راستای تشعشع مستقیم (I_{dn}) و شار تشعشع کل ورودی به سطح عمود بر راستای تشعشع مستقیم (I_{n}) در سه ساعت مختلف از روز متوسط هر ماه محاسبه و نتایج در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

با توجه به محدوده مقادیر I_{n} ارائه شده در جدول ۱ و برای این که بتوان از اجاق حداقل در ۸ ماه از سال در ساعات آفتابی وسط روز استفاده نمود، شار تشعشعی کل برخوردی به سطح صفحه انعکاسی (سطح عمود بر راستای تشعشع) حداقل ۸۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شد. در طراحی‌ها و محاسباتی

بدست می آید.

$$P_{\text{cook}} = \frac{e}{t} = \frac{58 \left(\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right)}{180(\text{s})} = 0.322 \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right) \quad (5)$$

ضریب انعکاس سطح انعکاسی کمتر از یک است و همچنین ضریب جذب صفحه پخت نیز از یک کمتر است. همچنین از صفحه پخت افت‌های مختلفی وجود دارد که در بخش ۳-۲ به راجع به آن‌ها بحث می‌شود. در اینجا برای تکمیل پیش‌نیازهای محاسباتی فرض می‌شود که کل انرژی لازم برای پخت نان از تشعشع دریافتی در زمان سه دقیقه‌ای پخت تأمین شود ولی بازده کلی اجاق (η) حدود ۵۰٪ باشد. لذا برای شرایطی که شدت تشعشع برخوردی (G_r) به صفحه انعکاسی ۸۰۰ وات بر متر مربع باشد توان در دسترس بر واحد سطح صفحه انعکاسی برابر است با:

$$P_{\text{eff}} = G_r \times \eta$$

$$\Rightarrow P_{\text{eff}} = 800 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \times 0.5 = 400 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = 0.04 \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right) \quad (6)$$

با تقسیم توان لازم برای پخت بر واحد سطح نان به توان در دسترس بر واحد سطح صفحه انعکاسی، نسبت سطح صفحه انعکاسی به سطح صفحه پخت، R ، عبارت می‌شود از:

$$R = \frac{P_{\text{cook}}}{P_{\text{eff}}} = \frac{0.322}{0.04} = 8 \quad (7)$$

یعنی سطح صفحه انعکاسی باید ۸ برابر سطح صفحه پخت باشد. قطر صفحه پخت ۴۸ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود و لذا قطر صفحه انعکاسی عبارت می‌شود از:

$$R = \left(\frac{D_{\text{mirror}}}{D_{\text{Bp}}} \right)^2 = \left(\frac{D_{\text{mirror}}}{0.48} \right)^2 = 8$$

$$\Rightarrow D_{\text{mirror}} = 135 \text{ (cm)} \quad (8)$$

فاصله کانونی سهمی، P ، از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. x و y مختصات مرکز انحنا سهمی هستند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

$$x^2 = 4Py \quad (9)$$

از آنجا که تمرکز تشعشع باید روی همه صفحه پخت باشد و نیازی به تمرکز در یک نقطه کانونی نیست، این صفحه باید در فاصله حدود ۹۰ سانتی‌متری از کف عدسی مقعر قرار بگیرد. در این تحقیق برای راحتی از یک عدد عدسی سهمی آماده شده از جنس آهن گالوانیزه برای ساخت تانکر با قطر کلی

جدول ۱ مؤلفه‌های مختلف تشعشع ورودی به سطح عمود بر تشعشع مستقیم در روز متوسط ماه در کاشان

نام ماه‌ها	ساعت	$I_n (\text{W/m}^2)$	$I_{dn} (\text{W/m}^2)$	$I_{bn} (\text{W/m}^2)$	$I (\text{W/m}^2)$ [۱۷]
فروردین	۹-۱۰	۸۲۱	۱۶۶	۶۵۵	۶۷۷
	۱۰-۱۱	۸۸۴	۱۸۹	۶۹۵	۷۹۵
	۱۱-۱۲	۸۵۳	۲۴۱	۶۱۲	۸۰۷
	۹-۱۰	۸۹۵	۱۵۲	۷۴۳	۷۶۶
اردیبهشت	۱۰-۱۱	۹۷۲	۱۵۹	۸۱۳	۹۰۴
	۱۱-۱۲	۹۸۹	۱۷۰	۸۱۹	۹۶۰
	۹-۱۰	۹۶۰	۱۳۲	۸۲۸	۸۲۸
	۱۰-۱۱	۹۸۶	۱۵۵	۸۳۱	۹۳۰
خرداد	۱۱-۱۲	۱۰۱۸	۱۶۶	۸۵۲	۱۰۰۰
	۹-۱۰	۸۹۰	۱۵۷	۷۳۳	۷۷۰
	۱۰-۱۱	۹۵۲	۱۶۶	۷۸۶	۸۹۴
	۱۱-۱۲	۹۷۹	۱۷۴	۸۰۵	۹۵۸
مرداد	۹-۱۰	۹۰۴	۱۳۶	۷۶۸	۷۴۷
	۱۰-۱۱	۹۸۸	۱۴۵	۸۴۳	۸۹۳
	۱۱-۱۲	۱۰۱۲	۱۵۵	۸۵۷	۹۶۰
	۹-۱۰	۹۹۰	۱۰۰	۸۹۰	۷۲۵
شهریور	۱۰-۱۱	۱۰۳۴	۱۲۶	۹۰۸	۸۵۸
	۱۱-۱۲	۱۰۲۱	۱۳۸	۸۸۳	۸۹۶
	۹-۱۰	۹۶۵	۷۸	۸۸۷	۵۹۶
	۱۰-۱۱	۹۹۵	۹۹	۸۹۶	۷۱۶
مهر	۱۱-۱۲	۱۰۰۶	۱۱۱	۸۹۵	۷۷۵
	۹-۱۰	۴۶۳	۱۰۹	۳۵۴	۴۲۰
	۱۰-۱۱	۷۷۶	۱۱۱	۶۶۵	۵۰۷
	۱۱-۱۲	۸۲۵	۱۲۳	۷۰۲	۵۷۵
آبان	۹-۱۰	۵۶۴	۱۰۲	۴۶۲	۳۲۷
	۱۰-۱۱	۶۷۲	۱۲۲	۵۵۰	۴۳۴
	۱۱-۱۲	۷۹۵	۱۱۳	۶۸۲	۵۱۸
	۹-۱۰	۷۰۴	۸۸	۶۱۶	۳۸۲
دی	۱۰-۱۱	۸۳۶	۹۴	۷۴۲	۵۱۰
	۱۱-۱۲	۹۷۸	۸۲	۸۹۶	۶۱۸
	۹-۱۰	۶۳۹	۱۳۹	۵۰۰	۴۴۲
	۱۰-۱۱	۷۸۰	۱۴۶	۶۳۴	۵۷۵
بهمن	۱۱-۱۲	۸۱۲	۱۵۹	۶۵۳	۶۳۳
	۹-۱۰	۸۴۶	۱۲۲	۷۲۴	۶۱۰
	۱۰-۱۱	۹۳۲	۱۳۳	۷۹۹	۷۴۸
	۱۱-۱۲	۸۹۱	۱۷۴	۷۱۷	۷۶۸

لذا توان لازم برای پخت بر واحد سطح نان از رابطه (۵)

شکل ۳ نشان دهنده شیب حدود ۱۰ درجه‌ای به سمت جنوب سطح انعکاسی در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۶ می‌باشد. لازم به ذکر است که در حرکت شمال- جنوب (تنظیم فصلی) تنها یک آچار مهره‌دار برای شل و سفت کردن وجود دارد که با توجه به زاویه سمت الرأس (رابطه ۱۰) مقدار زاویه تنظیم می‌شود.

همچنین با توجه به چرخش ۳۶۰ درجه‌ای زمین حول محور خودش در طول روز هر چند دقیقه، مثلاً هر ۲۰ دقیقه که معادل ۵° زمان خورشیدی است، می‌توان سطح انعکاسی را با چرخاندن به سمت شرق یا غرب دوباره به گونه‌ای تنظیم نمود که تشعشع بازتابی از آن فقط به زیر صفحه پخت برخورد کند. برای انجام این تنظیم ابتدا مهره سفت‌کننده حرکت شرقی-غربی توسط آچار مهره‌دار شل شده و سپس توسط دستگیره جفغه‌ای، که روی پایه مجموعه شده است، تغییر وضعیت انجام و سپس این مهره دوباره محکم می‌شود. مجموعه منعکس‌کننده با چهار چرخ ترمزدار تجهیز شده است تا امکان حمل و نقل آسان آن وجود داشته باشد، لذا می‌توان در هر محل دلخواه توسط ترمز در چرخ‌های متصل به پایه‌های اصلی آن را ساکن نمود. به دلیل برخورداری از رسانایی بالا جنس صفحه پخت از آلومینیوم در نظر گرفته شد. عمده‌ترین ویژگی آلومینیوم نجسب بودن آن است که نیاز به پوشش دادن آن با مواد نجسب را برطرف می‌کند.

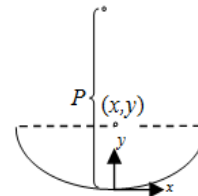


شکل ۲ چیدمان آینه‌ها



شکل ۳ مجموعه منعکس‌کننده شامل سطح انعکاسی، لولاها و آچار مهره‌دار آن

۱۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. ضخامت ورق این عدسی ۱/۲۵ میلی‌متر و بیشترین تقعر سهمی آن حدود ۹ سانتی‌متر است.



شکل ۱ مختصات سهموی مجموعه انعکاسی

از آینه‌های معمولی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر برای ایجاد سطح انعکاسی استفاده شد که ضریب انعکاسی در حدود ۰/۹ تا ۰/۹۵ دارند. این آینه‌ها به صورت شش ضلعی با فاصله هر دو ضلع موازی ۲۵ سانتی‌متر تهیه و داخل سطح سهموی با چسب آفیکس چسبانده شدند. در مجموع از ۱۹ عدد آینه شش ضلعی کامل و ۱۲ عدد آینه ناکامل استفاده شد. در شکل ۲ آینه‌های چیده شده در قالب عدسی نشان داده شده‌اند.

برای اینکه تشعشع بازتاب شده توسط سطح انعکاسی سهموی فقط به سطح زیرین صفحه پخت برخورد کند سه درجه آزادی برای تنظیم ارتفاع و تنظیم زاویه‌ای فصلی و در طول روز آن منظور شد. برای تنظیم ارتفاع مجموعه منعکس‌کننده دو جای پیچ روی پایه‌ی اصلی مجموعه تعبیه شد. در شکل ۳ مجموعه منعکس‌کننده و آچار مهره‌دار و لولاها‌ی مربوط به تنظیم زاویه فصلی و در طول روز نشان داده شده است.

مجموعه انعکاسی باید به سمت جنوب چرخانده شود تا در ظهر خورشیدی محور تقارن مجموعه انعکاسی با راستای تشعشع مستقیم خورشیدی همسان شود. شیب لازم در نیمکره شمالی برای یک روز مشخص از هر ماه از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$\theta_z = \phi - \delta \quad (10)$$

در رابطه فوق θ_z زاویه بین عمود بر یک صفحه افقی با راستای تشعشع خورشیدی و معروف به زاویه سمت الرأس، ϕ عرض جغرافیای محل و δ زاویه میل یا انحراف خورشیدی می‌باشد. در شروع فصل تابستان (اوایل ماه ژوئیه) که زاویه میل (δ) بیشینه مقدار است، طبق رابطه (۱۰) برای کاشان:

$$\theta_z = \phi - \delta = 33.59 - 23.5 = 10^\circ$$

برای جلوگیری از هدر رفت گرمای صفحه پخت و نان در حین پخت، به دلیل جابجایی و تشعشع به آسمان، یک کلاهک عایق برای رویه صفحه پخت لحاظ و ساخته شد. این کلاهک شامل یک قطعه ورق ۰/۱ میلی متری گالوانیزه به عرض ۱۰ سانتی متر است که تشکیل یک استوانه به قطر ۴۸/۵ سانتی متر را می دهد. همچنین قطعه چوبی دایره ای شکل از جنس ام دی اف به ضخامت ۵ میلی متر بالای آن نصب شده است تا رویه ای اصلی آن را تشکیل دهد. است. در شکل ۵ این کلاهک نشان داده شده است و سمت پایینی آن روی چسب سیلیکونی، که فاصله بین صفحه پخت و رینگ فولادی را پر کرده است، قرار می گیرد.

قرارگیری کلاهک روی صفحه پخت علاوه بر جلوگیری از افت های حرارتی از سمت بالا از تبخیر زیاد آب از خمیر در حال پخت جلوگیری نموده و لذا باعث می شود نان مزه و بوی تازگی خود را حفظ کند. با توجه به تکمیل ارائه مطالب مربوط به طراحی، مونتاژ و ساخت اجزای مختلف اجاق، در شکل ۶ وضعیت نهایی مونتاژ شده اجاق و کلیه قسمت های اصلی آن نشان داده شده است.



شکل ۵ کلاهک صفحه پخت



شکل ۶ اجاق خورشیدی پخت نان

این صفحه یک تکه و به ضخامت ۶ میلی متر ساخته شد و برای سادگی از رنگ مشکی مات به عنوان پوشش در زیر صفحه پخت استفاده شد. سطوح منتخب که در کلکتورهای تجاری استفاده می شوند ضریب جذبی در حدود ۰/۹ دارند ولی پوشش رنگ سیاه مات ضریب جذب حدود ۰/۸ را ایجاد می کند [۱۲].

صفحه پخت آلومینیومی توسط یک رینگ فولادی به ضخامت ۱ میلی متر، ارتفاع ۳ سانتی متر و قطر ۴۹ سانتی متر مهار شده است. همچنین این صفحه از زیر توسط ۴ تکه عایق از جنس فیبر استخوانی به لبه ای داخلی رینگ فولادی متصل است. ویژگی بارز فیبرهای استخوانی عایق حرارتی بودن آنهاست که در دستگاه های جوش کاری برای عایق سازی حرارتی تا دمای 1500°C از آنها استفاده می شود. شکاف ۰/۵ سانتی متری بین صفحه پخت و رینگ فولادی توسط چسب سیلیکونی که عایق حرارتی خوبی بوده و تحمل حرارتی بالایی دارد، پر شده است. برای ایجاد امکان جابجا نمودن صفحه پخت یک ورق فولادی به شکل U درآمده و در دو طرف به رینگ فولادی جوش داده شده است. این قطعه U شکل که روی پایه اصلی قرار می گیرد لغزیده و جابجایی صفحه پخت را ممکن می کند. برای کاهش افت جابجایی ناشی از جریان هوا از زیر صفحه پخت و همچنین جلوگیری از بخشی از افت تشعشعی از این سمت، یک ورق گالوانیزه ای به ضخامت ۰/۱ میلی متر، ارتفاع ۱۰ سانتی متر و قطر ۴۹ سانتی متر به بدنه بیرونی رینگ فولادی پیچ شده است. وجود این حفاظ گالوانیزه ای باعث می شود که بخشی از تشعشع منعکس شده از صفحه پخت دوباره به صفحه پخت بازتاب شود. شکل ۴ صفحه پخت به همراه محافظ گالوانیزه ای آن در شرایطی که روی پایه های اصلی قرار دارد را نشان می دهد. در مجموع وزن صفحه پخت آلومینیومی با رینگ فولادی محافظ و حفاظ گالوانیزه ای حدود ۵ کیلوگرم است.



شکل ۴ صفحه پخت آلومینیومی و محافظ گالوانیزه ای آن

۳-۳- بررسی افت‌ها و بازده کلی

صفحه پخت از سمت زیر به دلیل جابجایی و تشعشع مادون قرمز افت حرارتی دارد. نصب محافظ گالوانیزه‌ای به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تا حدود زیادی مانع از انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی از این سمت می‌شود. همچنین افت هدایتی از اطراف به رینگ محافظ توسط چسب سیلیکونی کنترل شده است و از افت هدایتی مربوط به اتصال صفحه پخت به رینگ محافظ نیز توسط فیبرهای استخوانی جلوگیری شده است. صفحه پخت از سمت بالا انتقال حرارت بصورت جابجایی و تابش با آسمان دارد. در طول مرحله پخت کلاهی روی صفحه پخت قرار داده می‌شود، ولی زمانی که خمیر باید روی صفحه پخت قرار داده شود یا نان در حال پخت پشت و رو می‌شود کلاهی از روی صفحه پخت برداشته می‌شود و جابجایی آزاد و جابجایی ناشی از وزش باد باعث افت حرارتی قابل ملاحظه‌ای می‌شود که در مقایسه با سایر افت‌ها چشمگیر است. از آنجا که برای محاسبه همه افت‌ها فرضیات زیادی لازم است از محاسبه همه آن‌ها اجتناب می‌شود ولی فرض می‌شود کلاهی روی صفحه پخت قرار نداشته باشد و فقط افت ناشی از جابجایی به خاطر وجود باد وجود داشته باشد. اگر دمای متوسط صفحه پخت 180°C و دمای هوای محیط 36°C باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی ناشی از باد عبارتست از [۱۸]:

$$h = 2.8 + 3V \quad (11)$$

در منطقه کاشان در فصل مورد آزمایش سرعت باد به طور متوسط حدود $2/3$ متر بر ثانیه است، لذا:

$$h = 2.8 + 3(2.3) = 9.7 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$$

در نتیجه افت حرارتی ناشی از جریان باد بر واحد سطح صفح پخت (H) عبارت است از:

$$H = h \Delta T = h (T_p - T_{\text{amb}}) = 9.7 \times (180 - 36) = 1397 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (12)$$

با فرض اینکه ضریب انعکاس آینه‌ها $0/9$ باشد، تشعشعی که توسط صفحه پخت جذب می‌شود بر واحد سطح آن برابر است با:

$$G_p = G_r \times R \times \rho_{\text{mirror}} \times \alpha_p = 800 \times 8 \times 0.9 \times 0.8 = 4608 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (13)$$

لذا با توجه به وجود تلفات، توان مفید و مؤثر پخت بر واحد سطح پخت برابر است با:

$$P_{\text{eff}} = G_p - H = 4608 - 1397 = 3211 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (14)$$

بنابراین بازده کلی اجاق عبارت می‌شود از:

$$\eta = \frac{P_{\text{eff}}}{G_r \times R} = \frac{3211}{800 \times 8} = 50\% \quad (15)$$

لذا فرضی که در بخش ۳-۲ به عنوان بازده کلی اجاق در نظر گرفته شد دور از واقعیت نیست.

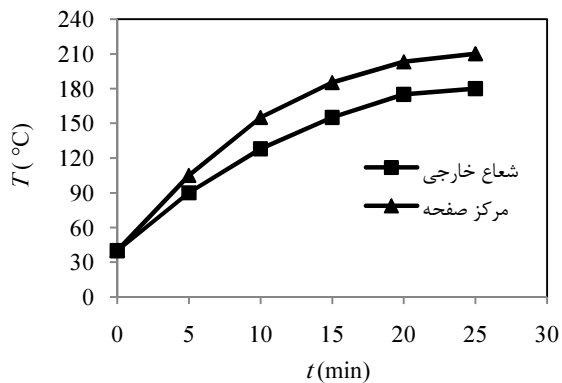
صفحه پخت بالای مجموعه انعکاسی قرار دارد، لذا در محدوده زمانی ظهر خورشیدی مسیر تشعشع مستقیم خورشیدی را سد می‌کند. لذا سایه آن روی سطح انعکاسی می‌افتد و باعث کاهش بازده کلی می‌شود. در همه فصول سال مشکل سایه اندازی صفحه پخت روی صفحه انعکاسی در نزدیکی به زمان ظهر خورشیدی وجود دارد. به دلیل فاصله بین صفحه پخت و سطح انعکاسی در بعضی مواقع سایه به وجود آمده حتی از اندازه صفحه پخت بزرگتر است. در شکل ۷ سایه صفحه پخت بر روی صفحه انعکاسی در ظهر خورشیدی به وضوح دیده می‌شود. برای اجتناب از سایه‌اندازی بهترین زمان پخت قبل از ساعت ۱۱ و بعد از ساعت ۱۳ خورشیدی می‌باشد.

۴- وسایل اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری دمای صفحه پخت از ترمومتر دیجیتال 6801B (ساخت شرکت TM تایوان) و یک پراپ سطحی نوع k حساس (ساخت شرکت TES تایوان) با دقت $0/1^{\circ}\text{C}$ استفاده شد. برای اندازه‌گیری شدت تشعشع خورشیدی از سولاریمتر یا سولار پاورمتر مدل 1333R (ساخت شرکت TES تایوان) با دقت $0/1$ وات بر متر مربع استفاده شد. همچنین از یک کرنومتر برای اندازه‌گیری طول زمان پخت و طول زمان پیش‌گرم شدن یا بازایی دمای صفحه پخت استفاده شد.



شکل ۷ سایه‌اندازی صفحه پخت روی سطح انعکاسی در ظهر خورشیدی



شکل ۹ تغییر دمای صفحه پخت حین پیش گرم شدن با وجود کلاهک عایق در تاریخ ۱۳۹۱/۳/۲۸

همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است بعد از گذشت ۲۵ دقیقه دما در مرکز صفحه پخت به 210°C رسیده است، ولی دما در شعاع خارجی آن حدود 30°C کمتر است. این تفاوت دما نشان می‌دهد که به دلیل سهمی بودن سطح انعکاسی تشعشع برخوردی به مرکز صفحه پخت شدت بیشتری دارد و همچنین جهت انتقال حرارت هدایتی از مرکز صفحه به سمت شعاع خارجی آن است.

۵-۲- پخت نان نرم

بطور کلی اگر نان در مدت زمان طولانی و دمای کم پخت شود دارای رطوبت باقی مانده کم (نان خشک) و اگر در زمان کم ولی در دمای زیاد پخت شود دارای رطوبت باقی مانده بیشتری است (نان نرم). پخت نان نرم از ساعت حدود ۱۰ صبح روز ۱۳۹۱/۴/۴ شروع شد. در حین آماده شدن خمیر، اجاق برای پیش گرم شدن صفحه پخت راه اندازی شد. در شرایطی که در اکثر اوقات کلاهک عایق روی صفحه پخت قرار داشت پس از گذشت ۲۵ دقیقه دمای آن به 200°C رسید. سپس اولین خمیر آماده شده و پهن شده روی صفحه پخت قرار داده شد و بلافاصله کلاهک عایق جایگزین شد. بعد از گذشت حدود ۲ دقیقه که یک سمت نان پخته شد، نان روی صفحه پخت برگردانده شد و حدود یک و نیم دقیقه دیگر طول کشید تا سمت دیگر نان نیز پخته شود. لازم بذکر است که قضاوت در خصوص پخته شدن نان بصورت بصری انجام شد. در طول انجام آزمایش‌ها هر ۲۰ دقیقه یک بار سطح انعکاسی حول محور شمال-جنوب چرخانده شد تا تشعشع انعکاسی آن

۵- بررسی تجربی عملکرد اجاق

عملکرد اجاق خورشیدی پخت نان با بررسی زمان لازم برای پیش گرم شدن صفحه پخت و همچنین حصول دمای لازم برای پخت انجام شد و در این خصوص نقش کلاهک عایق بررسی و در چند مرحله هم کار پخت نان انجام شد. آزمایش‌ها در محوطه حیاط مرکزی ساختمان کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دانشگاه کاشان انجام شد. گزارش کامل انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در [۱۹] ارائه شده است و در بخش‌های بعد فقط برخی نتایج تجربی بدست آمده بصورت خلاصه ارائه و بحث می‌شوند.

۵-۱- پیش گرم شدن اولیه صفحه پخت

در آزمایشی که در تاریخ ۱۳۹۱/۳/۲۸ انجام شد زمان لازم برای پیش گرم شدن اولیه بررسی شد. ابتدا پایه‌های نگهدارنده مجموعه صفحه پخت در راستای شمال-جنوب قرار داده شد و سپس مجموعه منعکس کننده زیر مجموعه صفحه پخت قرار گرفت و تنظیم زاویه‌ای صفحه انعکاسی آن به گونه‌ای انجام شد که تشعشع بازتابی از آن درست به زیر صفحه پخت برخورد کند. برای اجتناب از وجود سایه روی سطح انعکاسی این آزمایش از ساعت ۱۶ عصر شروع شد و تنظیم زاویه‌ای شرقی-غربی سطح انعکاسی هر ۲۰ دقیقه و به گونه‌ای انجام شد که علی‌رغم گذشت زمان همواره تشعشع انعکاسی به طور کامل به زیر صفحه پخت برخورد کند. نمونه‌ای از برخورد تشعشع به زیر صفحه پخت که آن را روشن‌سازی نموده است در شکل ۸ نمایش داده شده است. هر ۵ دقیقه دما در مرکز صفحه پخت و در شعاع خارجی آن اندازه گرفته شد و به جز در زمان اندازه‌گیری دما در بقیه اوقات کلاهک عایق روی صفحه پخت قرار داشت. تغییر دما با زمان اندازه‌گیری شده در مرکز صفحه پخت و در شعاع خارجی آن در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸ برخورد تشعشع به زیر صفحه پخت

صفحه پخت حدود 180°C بود در انتهای پخت این دما به حدود 160°C کاهش پیدا کرد.



شکل ۱۱ نمونه‌ای از نان خشک پخته شده در روز ۱۳۹۱/۴/۴

همچنین توزین هر قطعه نان پخته شده وزن آن را 150 گرم نشان داد. لذا مشخص شد که تبخیر آب از خمیر اولیه 200 گرمی حدود 50 گرم یعنی حدود 25% از وزن اولیه شده بود. این تبخیر بدلیل زمان لازم بیشتر برای پخت نان در اجاق خورشیدی در مقایسه با زمان پخت حدود 30 ثانیه‌ای نان لواش در تنورهای گردان و همچنین تفاوت روش پخت قابل پذیرش است. در واقع مشخص شد که بدلیل تبخیر، انرژی بیشتری برای پخت لازم شده است که بخشی از آن از گرمای ذخیره شده در خود صفحه پخت تأمین شده است.

در این قسمت با توجه به میزان واقعی تبخیر محاسبات مربوط به انرژی لازم برای پخت نان و نحوه تأمین آن تکرار می‌شوند تا دلایل کاهش دمای صفحه پخت مشخص شود و همچنین زمان لازم برای پیش‌گرم شدن مجدد آن مشخص شود. اگر Q_1 مقدار انرژی لازم برای گرم شدن 200 گرم خمیر از دمای حدود 25°C تا 95°C و Q_2 مقدار انرژی لازم برای تبخیر حدود 50 گرم آب موجود در خمیر در طول زمان پخت باشد، کل انرژی لازم برای پخت نان برابر مجموع Q_1 و Q_2 و عبارت است از:

$$\begin{aligned} E &= Q_1 + Q_2 = m_{\text{Dough}} c_{\text{Dough}} \Delta T + m_{\text{water}} h_{\text{fg}} \\ &= 0.2 \times 3850 \times 70 + 0.05 \times 2260 \times 10^3 \\ &= 166900 \text{ (J)} \end{aligned} \quad (16)$$

این در شرایطی است که قبلاً و با فرض تبخیر 10 درصدی کل انرژی لازم برای پخت چانه خمیر 200 گرمی حدود 166900 برآورد شد. در نتیجه مشخص می‌شود که بخشی از انرژی مورد نیاز برای پخت از گرمای ذخیره شده در صفحه پخت تأمین می‌شود و به همین دلیل است که دمای صفحه

درست به زیر صفحه پخت برخورد نماید. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از نان پخته شده در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۴ نشان داده شده است.

در این آزمایش زمان تقریبی پخت نان مسطح نرم حدود سه دقیقه و سی ثانیه طول کشید. این زمان با فرضیات بیان شده در محاسبات طراحی تطابق خوبی نشان می‌دهد. البته اندازه‌گیری دما در مرکز صفحه پخت بعد از اتمام پخت نان نشان داد که این دما به حدود 160°C کاهش یافته است، لذا برای پخت چانه بعدی لازم شد ابتدا به مدت حدود 2 دقیقه صفحه پخت پیش‌گرم شود. ضمناً در این فاصله زمانی کلاهیک عایق روی صفحه پخت قرار داده شد تا صفحه پخت سریع‌تر به دمای حدود 180°C برسد.

۵-۳- پخت نان خشک

تفاوت پخت نان خشک با پخت نان نرم عمدتاً مربوط به بازه زمانی است که خمیر روی صفحه پخت باقی می‌ماند. همچنین برای پخت نان خشک لازم نیست دما همان دمای مربوط به پخت نان نرم باشد. در آزمایش‌هایی که در بعد از ظهر ۱۳۹۱/۴/۴ برای پخت نان خشک انجام شد در شرایطی که دمای صفحه پخت ابتدا حدود 160°C بود هر چانه خمیر پهن شده و روی صفحه پخت قرار داده شد. پخت هر نان خشک با چانه خمیر 200 گرمی مجموعاً حدود 5 دقیقه طول کشید و در خاتمه پخت دمای صفحه حداکثر 10°C کاهش یافت. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از نان خشک پخته شده توسط اجاق خورشیدی در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ نمونه‌ای از نان نرم پخته شده در روز ۱۳۹۱/۴/۴

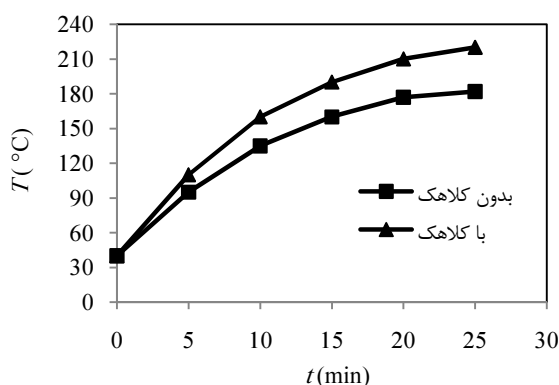
۵-۴- بررسی دلیل کاهش دمای صفحه پخت در طول

زمان پخت

در اولین آزمایش‌هایی که برای پخت نان نرم انجام شد دو موضوع مشخص شد. اولاً در شرایطی که دمای اولیه در مرکز

استفاده از کلاهک عایق انجام شد مشخص شد که در صورت عدم وجود کلاهک اولاً زمان پخت طولانی شده و ثانیاً در نان پخته شده رطوبت چندانی باقی نمی ماند. برای بررسی تأثیر کلاهک عایق در جلوگیری از افت های از سمت بالای صفحه پخت در آزمایش هایی که در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۲ بین ساعت ۹ تا ۱۱ صبح برای اندازه گیری زمان پیش گرم شدن اولیه صفحه پخت انجام شد دو وضعیت با کلاهک و بدون کلاهک مورد نظر قرار گرفتند. در نمودارهای شکل ۱۲ تغییر دمای صفحه پخت با گذشت زمان در هر دو حالت نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که پس از گذشت ۲۵ دقیقه، و در شرایطی که در هر دو وضعیت از پیش گرم شدن دمای اولیه صفحه پخت یکسان بوده است، وجود کلاهک عایق بطور نسبی باعث افزایش دمای صفحه پخت تا حدود ۲۰٪ شده است. این تفاوت دما نشان می دهد که عدم استفاده از کلاهک عایق باعث افت حرارتی به اندازه ای حدود ۷۹۰۰۰ J شده است. لذا استفاده از کلاهک عایق در طول زمان پخت هم باعث کاهش افت های حرارتی و هم باعث افزایش دمای صفحه پخت و راندمان کلی اجاق می شود. به علاوه باعث می شود آب کمتری از نان تبخیر شود و در پایان پخت نان نرم تری بدست آید که بو مزه و کیفیت بهتری نیز دارد.



شکل ۱۲ تغییر دمای صفحه پخت در زمان پیش گرم شدن در دو وضعیت با وجود کلاهک عایق و بدون آن در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۲

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق طراحی و ساخت یک دستگاه اجاق خورشیدی پخت نان برای پخت نان نازک در مقیاس خانگی انجام شد و اجاق ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. در این اجاق یک

پخت کاهش می یابد. بدون توجه به افت ها مقدار شار تابشی که از سطح انعکاسی به سطح صفحه پخت می رسد بر واحد سطح آن برابر است با:

$$G_p = G_r \times R = 800 \left(\frac{W}{m^2} \right) \times 8 = 6400 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (17)$$

با توجه به بازده کلی ۵۰ درصدی، انرژی لحظه ای دریافتی توسط صفحه پخت برابر است با:

$$G_{eff} = G_p \times A_{AL} \times \eta = 6400 \left(\frac{W}{m^2} \right) \times \left(\frac{\pi}{4} \times (0.48^2) \right) (m^2) \times 0.5 = 580 (W) \quad (18)$$

ظرفیت گرمایی آلومینیوم خالص حدود $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ ۹۰۰ و چگالی آن $(kg \cdot m^{-3})$ ۲۷۰۰ می باشد. لذا جرم صفحه پخت برابر است با:

$$m_{AL} = \rho_{AL} \times A_{AL} \times t = 2700 \times \left(\frac{\pi}{4} \times (0.48^2) \right) \times 0.006 = 2.93 (kg) \quad (19)$$

با فرض این که دمای اولیه صفحه پخت $180^\circ C$ باشد و نان در طول ۳ دقیقه پخته شود، دمای این صفحه پس از پایان پخت از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = G_{eff} \times t + m_{AL} c_{AL} \Delta T, \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

$$66900 = 580 \times 3 \times 60 + 2.93 \times 900 \times (180 - T_2)$$

$$\Rightarrow T_2 = 156^\circ C \quad (20)$$

T_1 و T_2 به ترتیب دمای صفحه پخت در شروع پخت و دمای نهایی آن بعد از پخت هر نان هستند. لذا پس از هر ۳ دقیقه که پخت هر نان تمام می شود باید صفحه پخت مجدداً پیش گرم شود تا دمای آن به $180^\circ C$ برسد. با فرض دمای اولیه $180^\circ C$ ۱۵۶ زمان گرم شدن مجدد صفحه پخت برای رسیدن دمای آن به $180^\circ C$ برابر است با:

$$G_{eff} \times t = m_{AL} c_{AL} \Delta T$$

$$580 \times t = 2.93 \times 900 \times (180 - 156)$$

$$\Rightarrow t = 109 (s) \quad (21)$$

پس حدود ۲ دقیقه طول می کشد تا صفحه پخت مجدداً پیش گرم شده و آماده پخت نان بعدی شود.

۵-۵- اثر قرارگیری کلاهک عایق روی صفحه پخت

در آزمایش هایی که در چند دفعه برای پخت نان نرم ولی بدون

شدت تشعشع خورشیدی ($W.m^{-2}$)	G	سطح انعکاسی قابل تنظیم تشعشع خورشیدی را به صورت
تلفات حرارتی از صفحه پخت نان ($W.m^{-2}$)	H	متمرکز شده به زیر صفحه پخت می‌تاباند. اجاق بسیار ساده و
متوسط ساعتی شار تشعشع خورشیدی ورودی ($W.m^{-2}$)	I	دارای قسمت‌های اصلی مجموعه منعکس‌کننده، مجموعه
ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	h	صفحه پخت و مجموعه پایه‌های نگهدارنده می‌باشد. نتایج
توان بر واحد سطح ($W.m^{-2}$)	P	بدست آمده از تحلیل‌ها و انجام آزمایش‌ها عبارتند از:
انرژی لازم پخت بر واحد جرم خمیر ($J.gr^{-1}$)	q	۱- برای پخت نان نازک نرم به قطر حدود ۴۵ سانتی‌متر و
نسبت سطح انعکاسی به سطح صفحه پخت	R	وزن چانه ۲۰۰ گرم دمای متوسط و اولیه صفحه پخت باید
دما ($^{\circ}C$)	T	حداقل $180^{\circ}C$ باشد. این دما پس از حدود ۲۰ الی ۲۵ دقیقه
ضخامت (m)	t	بعد از راهاندازی اولیه اجاق خورشیدی پخت نان قابل حصول
سرعت باد ($m.s^{-1}$)	V	می‌باشد.

علائم یونانی:

ضریب جذب	α	۲- اجاق در ۸ ماه از سال قابلیت حداقل ۶ ساعت پخت نان
ضریب صدور	ε	در هر روز آفتابی را دارد و در هر ساعت بین ۱۰ تا ۱۲ عدد نان
راندمان	η	نرم پخت می‌کند. لذا نان مورد نیاز ۳ روز هر خانوار ۴ نفره را
چگالی ($kg.m^{-3}$)	ρ	می‌توان بصورت خانگی در مدت ۳ ساعت طبخ نمود. پخت هر
عرض جغرافیایی	ϕ	نان مجموعاً در حدود ۵ دقیقه انجام می‌شود، ولی بخشی از این
زاویه میل یا زاویه انحراف خورشیدی	δ	زمان مربوط به پیش‌گرم شدن صفحه پخت برای طبخ نان

زیرنویس‌ها:

آلومینیوم	AL	۳- در طول زمان پخت نان نرم استفاده از کلاهک عایق
مولفه مستقیم ورودی به سطح عمود بر راستای	bn	روی صفحه پخت ضروری است. وجود آن باعث کاهش افت‌های
تثعشع مستقیم		حرارتی و در نتیجه افزایش دمای صفحه پخت و نیز راندمان
مولفه پخش شده ورودی به سطح عمود بر	dn	کلی دستگاه پخت نان می‌شود و همچنین کیفیت نان پخته
راستای تثعشع مستقیم		شده را بهبود می‌بخشد.
مؤثر	eff	۴- با این اجاق امکان پخت نان مطابق سلیقه مصرف‌کننده
تجربی	exp	از نظر کیفیت و مواد افزودنی وجود دارد. این اجاق برای پخت
سطح عمود بر راستای تثعشع مستقیم	n	نان طراحی شده است، ولی از آنجا که دمای صفحه پخت آن
صفحه پخت	P	براحتی به بالای $200^{\circ}C$ می‌رسد می‌توان با استفاده از آن
تثعشع برخوردی	r	پخت سایر مواد غذایی را هم انجام داد.
بازتابنده	ref	۵- اجاق خورشیدی طراحی شده جایگزین خوبی برای
کل	tot	تنورهای سنتی خانگی است که به جز در برخی مناطق
		روستایی و عشایری استفاده از آن‌ها منسوخ شده است.

۷- فهرست علائم

ظرفیت حرارتی ویژه ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	c
قطر (m)	D
انرژی لازم پخت بر واحد سطح نان ($J.cm^{-2}$)	e
انرژی کل لازم برای پخت نان (J)	E

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان به دلیل حمایت مالی از انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌نمایند.

۹- مراجع

- [11] Amer E.H., "Theoretical and experimental assessment of a double exposure solar cooker", *Energy Conversion and Management*, Vol 44, No 16, 2003, pp. 2651-2663.
- [12] Reddy A.R., Narasimha A.V.R., "Prediction and experimental verification of performance of a box type solar cooker. Part-I: Cooking vessel with central cylindrical cavity", *Energy Conversion and Management*, Vol 48, No 7, 2007, pp. 2034-2043.
- [13] Liu Z., Lapp J., Lipinski W., "Optical design of a flat-face solar concentrator", *Solar Energy*, Vol 86, No 2, 2012, pp. 1962-1966.
- [14] Narasimha A.V.R., Subramanyam S., "Solar cookers. Part 1: Cooking vessel on lugs", *Solar Energy*, Vol 75, No 1, 2003, pp. 181-185.
- [15] Khalifa A.M.A., Taha M.M., Akyurt M., "On prediction of solar cooker performance and cooking in Pyrex pots", *Solar Wind Technol*, Vol 3, No 1, 1986, pp. 13-19.
- [16] Muthusivagami R.M., Velraj R., Sethumadhavan R., "Solar Cookers with and without Thermal Storage – A review". *Renewable and sustainable Energy Reviews*, Vol 14, No 2, 2010, pp. 691-701.
- [17] Website of Renewable Energy Organization of Iran (SUNA);
<http://www.suna.org.ir/fa/ationoffice/windenergyof fice/windamar>, [Accessed 25/03/2012].
- [18] Duffie J.A., Backman W.A., "Solar engineering of thermal processes", 3rd Ed, New York, Wiley publications, 2006.
- [19] Nazari S., "Design and manufacture of a solar bread cooker with concentrator and tesingt it", Master of Science Thesis in Mechanical Engineering, University of Kashan, 2012. (In Persian)
- [1] Brunicki L.Y., "Sustainable energy for rural areas of the developing countries", *Energy and Environment*, Vol 13, No 1, 2002, pp. 515-522.
- [2] Panwar N.L., Kaushik S.C., Kothari S., "Role of renewable energy sources in environmental protection", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, No 3, 2011, pp. 1513-1524.
- [3] Authors group of Renewable Energy Organization of Iran, "What do you know about renewable energies? (Solar energy)", *Publication of Renewable Energy Organization of Iran*, 2006, page 15. (In Persian)
- [4] Panwara N.L., Kaushika S.C., Kothari S., "State of the art of solar cooking", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 16, No 6, 2012, pp. 3776-3785.
- [5] Saxena A., Varun, Pandey S.P., Srivastav G., "A thermodynamic review on solar box type cookers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, No 6, 2011, pp. 3301-3318.
- [6] Tiwari G.N., Yadav Y.P., "A new solar cooker design", *Energy Conversion and Management*, Vol 26, No 1, 1986, pp. 41-42.
- [7] Grupp M., Montagne P., Wackernagel W., "A novel advanced box-type solar cooker", *Solar Energy*, Vol 47, No 2, 1991, pp. 107-113.
- [8] Thulasi Das T.C., Karmarkar S., Rao D.P., "Solar box cooker: part I. Modeling", *Solar Energy*, Vol 52, No 3, 1994, pp. 265-272.
- [9] Thulasi Das T.C., Karmarkar S., Rao D.P., "Solar box cooker: part II. Modeling", *Solar Energy*, Vol 52, No 3, 1994, pp. 273-282.
- [10] Tabor H., "Mirror boosters for solar collectors", Solar Energy Conference in Jerusalem, 1996, National Physical Laboratory of Israel.