



تحلیل انرژی و انرژی و بررسی راهکارهای کاهش مصرف سوخت در واحدهای دست‌پز پخت نان‌های سنتی مسطح

سیدعبدالمهدی هاشمی^{۱*}، سروش صدری‌پور^۲، محمد استاجلو^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، ایران
^۲شرکت فنی و مهندسی فن آفرینی آلتون، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲ مهر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۹ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۵ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

مطالعه تجربی و تحلیلی
نان مسطح
انرژی
انرژی
کاهش مصرف سوخت

چکیده: در تحقیق حاضر، با انجام آزمایش‌های تجربی، تحقیقات میدانی و محاسبات تحلیلی، ابتدا برآورد دقیقی از بازده انرژی و انرژی و همچنین تلفات انرژی و مصرف سوخت انواع مختلف تنورهای دست‌پز پخت نان‌های سنتی مسطح انجام می‌شود و سپس راهکارهای کاربردی برای کاهش مصرف سوخت این نانوایی‌ها ارائه می‌شود. طبق نتایج، بازده انرژی تنورهای سنگ، بربری و تافتون بسیار پایین و به ترتیب در حدود ۲۱٪، ۱۲٪ و ۵٪ است. همچنین تحلیل انرژی نشان می‌دهد که در مورد تمام نانوایی‌ها، انرژی تلف شده از دودکش تنور از لحاظ ترمودینامیکی کیفیت بازیافت بالایی ندارد و سهم اصلی تلفات انرژی در این واحدها مربوط به احتراق سوخت و تلفات حرارتی از جداره‌های تنور است. نتایج نشان می‌دهند که با انجام عایق کاری برای تنورهای نانوایی می‌توان تا حدود ۶۵٪ تلفات حرارتی از جداره‌ها را کاهش داد. همچنین مشخص شد که با کاهش مقدار هوای اضافی ورودی به مشعل تا ۵٪ می‌توان تلفات حرارتی در اثر هوای اضافی را بیش از ۹۰٪ کاهش داد. در نهایت مشخص شد که با انجام راهکارهای فوق، می‌توان بازده انرژی و انرژی تنورهای نانوایی سنگ، بربری و تافتون را افزایش و مصرف سالیانه گاز طبیعی را برای این واحدها، به ترتیب در حدود ۵۸٪، ۶۶٪ و ۸۲٪ کاهش داد.

۱- مقدمه

نان قدیمی‌ترین و با ارزش‌ترین یافته غذایی بشر است و تاریخچه تولید آن به اواخر عصر حجر برمی‌گردد. ایران از مهم‌ترین کشورهای مصرف‌کننده نان در جهان محسوب می‌شود؛ بنابراین نان به‌عنوان غذای غالب مردم ایران نقش مهمی در تغذیه، صنعت و اقتصاد کشور ایفا می‌نماید [۱]. عمده نان مصرفی مردم ایران نان مسطح سنتی است و ذائقه مردم ایران به صورتی است که نان‌های صنعتی را نمی‌پسندند [۲]. به این ترتیب اهمیت مطالعه واحدهای پخت نان‌های سنتی مسطح در مقابل نان‌های صنعتی و نان‌های حجیم و نیمه‌حجیم در ایران مشخص می‌شود.

به میزان مصرف انرژی به‌ازای هر واحد از تولید کالاها و خدمات شدت مصرف انرژی گفته می‌شود. مقایسه شاخص شدت مصرف انرژی در ایران با بسیاری از کشورهای جهان، نشان‌دهنده وضعیت نابه‌نجار بهره‌برداری انرژی در ایران است. بنابراین با توجه به اینکه نان از کالاهای مهم کشور محسوب می‌شود، ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف سوخت در حوزه پخت نان بر بهبود وضعیت شدت مصرف انرژی در ایران تأثیرگذار است [۳]. یکی از منابع مهم انرژی در ایران، گاز طبیعی است که مصرف آن در تمامی بخش‌ها هر ساله رو به افزایش است [۴]. بر اساس گزارش‌ها، بیشترین میزان مصرف گاز طبیعی در کشور به‌ترتیب مربوط به بخش‌های تجاری و خانگی،

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hashemi@kashanu.ac.ir

نیروگاه‌ها و صنایع است [۵]. یکی از بخش‌های مهم تجاری که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته، صنعت پخت نان است. تقریباً تمامی نانوایی‌های کشور از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت مورد نیازشان استفاده می‌کنند و بدین ترتیب واحدهای پخت نان تأثیر زیادی در مصرف گاز طبیعی دارند. مطالعات صورت گرفته در زمینه پخت نان، به دو بخش کیفیت نان پخته شده و میزان انتقال حرارت لازم برای پخت و توزیع دمای داخل تنور تقسیم می‌شوند. برای بررسی میزان انرژی مصرفی و هدررفت انرژی در یک کوره یا تنور، ابتدا باید شناخت کاملی از توزیع دما و مکانیزم‌های انتقال حرارت آن محیط داشت. تحلیل انرژی امکان شناخت نرخ انرژی مصرفی و انرژی تلف شده را فراهم می‌سازد. در نتیجه روش مطلوب برای تحلیل سیستم‌های تبدیل انرژی شناخته می‌شود [۶].

فیلی‌زاده و همکاران [۷] دمای سطوح مختلف چند دستگاه صنعتی پخت نان را اندازه‌گیری نمودند و به‌وسیله آن نرخ حرارت اتلافی از دیواره‌ها، سقف، نقاله و همچنین از طریق گازهای خروجی را به‌دست آوردند. ملک‌محمدی و جلالی [۸] مقدار مصرف سوخت طی یک سال برای نان‌های سنگ، لواش سنتی، لواش ماشینی و بربری را در شهر تبریز بررسی نمودند.

تحلیل انرژی، روشی مناسب برای سنجش کارکرد اجزای فرآیند است. با این روش می‌توان انرژی نقاطی را که در آن‌ها تبدیل انرژی صورت می‌گیرد به‌دست آورد و راندمان اجزای سیکل را محاسبه نمود؛ همچنین

مصرف انرژی کشور سهیم بود.

در کار حاضر با انجام آزمایش و محاسبات تحلیلی برای سه نمونه از انواع مختلف دست‌پز نانویی‌های سنتی ایران در شهرستان‌های قم و کاشان، مقادیر نرخ انرژی ورودی به تنور (انرژی حاصل از احتراق سوخت)، نرخ انرژی مورد نیاز برای پخت نان، نرخ انرژی خارج شده از دودکش و نرخ انرژی تلف شده از جداره‌ها (دیواره‌ها و سقف) و دهانه تنور محاسبه می‌شوند. در ادامه با استفاده از تحلیل انرژی، سهم تلفات انرژی ناشی از برگشت‌ناپذیری‌ها نیز مشخص می‌شود. به این ترتیب برای نخستین بار تحلیل دقیقی از انواع نانویی‌های دست‌پز سنتی بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیک انجام می‌شود که راه را برای شناخت عوامل اتلاف انرژی، بهینه‌سازی و کاهش مصرف سوخت تنورهای نانویی هموار می‌نماید. در ادامه با توجه به نتایج تحلیل انرژی و انرژی، راهکارهای عملی و کاربردی برای کاهش مصرف سوخت واحدهای نانویی ارائه می‌شوند.

۲- الگوسازی تجربی

در کار حاضر دمای قسمت‌های مختلف داخل تنور، دمای دیواره‌های بیرونی تنور، دمای سوخت و هوای ورودی به مشعل، نرخ مصرف سوخت در حالت پخت و خواب تنور، مشخصات محصولات احتراق خروجی از دودکش و آلاینده‌ها و بازده احتراق به صورت دقیق اندازه‌گیری شده‌اند. در اندازه‌گیری‌ها از دماسنج ویدیویی غیرتماسی مادون قرمز، مدل ST-9861 استفاده شده است (شکل ۱). این دستگاه از طریق امواج مادون قرمز، درجه حرارت جسم را در محدوده دمایی بین -30°C تا 1600°C اندازه‌گیری می‌نماید. این دماسنج مجهز به نمایش‌گر دیجیتال است و می‌تواند تصاویر و مشخصات دمایی را ذخیره و به سیستم‌های کامپیوتری منتقل نماید [۱۹].



Fig. 1. Infrared thermometer ST-9861

شکل ۱: دستگاه دماسنج غیرتماسی مادون قرمز مدل ST-9861

هدف از محاسبه بازده احتراق، محاسبه گرمای باقی‌مانده داخل تنور است. به عبارت بهتر، هدف یافتن سهمی از گرمای حاصل از احتراق است که داخل تنور باقی می‌ماند و از دودکش خارج نمی‌شود. این گرما می‌تواند صرف پخت نان یا اتلاف از جداره‌های تنور شود. بدین منظور از دستگاه

می‌توان محل وقوع بیشترین تلفات را شناسایی و برای کاهش آن‌ها تلاش نمود [۹]. روزن و دینسر [۱۰] توصیه نموده‌اند که تحلیل انرژی، بهترین ابزار برای تصمیم‌گیری در جهت بهینه‌سازی سیکل با توجه به داده‌های ورودی سیکل است. شایان ذکر است که هدف اصلی استفاده از تحلیل انرژی در تنورها و کوره‌ها تعیین کیفیت بازیافت ترمودینامیکی تلفات انرژی و تصمیم‌گیری در مورد بازیافت حرارتی آن‌ها است.

نصرآزادانی و احمدی‌دانش [۱۱]، به تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه بخار پالایشگاه اصفهان پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان داد که بویلر مهم‌ترین عامل نابودی انرژی در نیروگاه است. بویلر نیروگاه همان بخشی است که احتراق انجام شده و انرژی حاصل از احتراق آزاد می‌شود و از این حیث شبیه به تنورها و کوره‌ها می‌باشد. ابوالفضل اصفهانی و جوادی [۱۲]، تولید انرژی در کوره متان-هوا را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد نرخ انجام واکنش شیمیایی بیشترین سهم را در تولید انرژی در جریان آشفته دارد. شیگاکا و همکاران [۱۳] یک فرآیند تولید فولاد را در کشور ژاپن مورد تحلیل انرژی قرار دادند. آن‌ها افت انرژی را به صورت تابعی از پارامترهایی نظیر نرخ اختلاط آهن خام در فرآیند کوره قوس الکتریکی و در نهایت افت انرژی کلی سیستم محاسبه نمودند. آکودو و همکاران [۱۴] به مطالعه تحلیل انرژی کوره تولید آلومینیوم پرداختند. هدف کار آن‌ها تجزیه و تحلیل و تعیین تلفات انرژی و برگشت‌ناپذیری‌های فرآیند تولید آلومینیوم با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک بود. لیو و همکاران [۱۵] با استفاده از آنالیز انرژی و انرژی با کمینه کردن تلفات انرژی به بهینه‌سازی یک کوره آهن پرداختند. آن‌ها جریان انرژی و انرژی قبل و بعد از بهینه‌سازی را تحلیل کردند. بورست و همکاران [۱۶] به تحلیل انرژی یک کوره سیلیکون پرداختند. آن‌ها بازده انرژی یک نمونه کوره جدید پیشنهادی را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند. گورتک و همکاران [۱۷] به تحلیل انرژی و انرژی یک واحد کوره پرلیت پرداختند. آن‌ها به کمک این تحلیل منابع اتلاف انرژی را شناسایی و راه‌حلهایی برای پیشگیری از آن‌ها ارائه کردند.

در دو دهه گذشته، با بالا رفتن قیمت انرژی و آسیب‌های زیست‌محیطی و همچنین محدود بودن منابع اصلی انرژی‌های تجدیدناپذیر، استفاده از سیستم‌های تولید و تبدیل انرژی با راندمان بیشینه به‌منظور صرفه‌جویی در این منابع ارزشمند، روز به روز اهمیت بیش‌تری یافته است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت داخل تنور مربوط به واحدهای صنعتی پخت نان بوده است و تاکنون مطالعه عددی و یا تجربی پیرامون تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی واحدهای دست‌پز پخت نان‌های مسطح سنتی ایران (سنگ، بربری، تافتون) انجام نشده است. این در حالی است که به دلیل تمایل بالای مردم برای مصرف نان‌های سنتی و رایج بودن پخت این نوع نان در کشور [۲ و ۱۸]، بدیهی است که اگر به جای صنعتی کردن پخت نان، بتوان وضعیت تنورهای سنتی موجود را به شکلی بهبود بخشید که از هدررفت گاز طبیعی جلوگیری شود، می‌توان در بهینه‌سازی

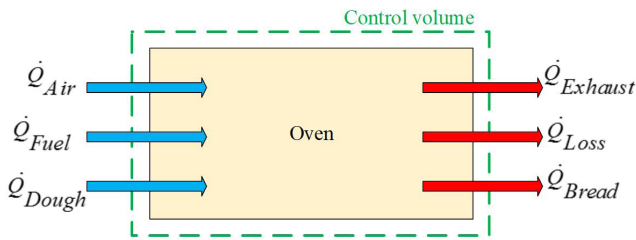


Fig. 3. Energy balance in oven

شکل ۳: مبادلات انرژی در تنور انواع مختلف نانویی‌ها

در رابطه فوق، \dot{m}_F دبی جرمی مصرف گاز طبیعی در تنور است و با استفاده از دبی حجمی خوانده شده از کنتور \dot{V}_F به دست می‌آید. خواص گاز طبیعی و ترکیب آن از استعلام‌های شرکت گاز منطقه‌ای به دست آمده است [۱۰، ۲۱ و ۲۲].

گرمایی که نان برای پخت نیاز دارد شامل حرارت اولیه برای افزایش دمای خمیر از دمای محیط تا دمای 100°C و همچنین حرارت لازم برای تبخیر آب خمیر در دمای 100°C می‌شود. اگر n_B تعداد چانه‌های خمیر قرار داده شده داخل تنور در بازه زمانی Δt باشد، نرخ انرژی مورد نیاز برای پخت نان، با احتساب ۱۰٪ ضریب اطمینان به دلیل وجود عوامل ناشناخته در فرآیند پخت و همچنین برشته شدن (قهوه‌ای شدن) نان، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_B = 1.1n_B \cdot \left[\frac{m_d \cdot c_{p,d} \Delta T + (m_d - m_B) h_{fg}}{\Delta t} \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق، m_d جرم چانه خمیر، m_B جرم نان پخته شده، $c_{p,d}$ ظرفیت گرمایی ویژه خمیر و برابر $2.76 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ و h_{fg} انتالپی تبخیر آب و برابر 2257.03 kJ/kg است [۲۳ و ۲۴].
نرخ انرژی تلف شده از طریق دودکش از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در این رابطه، η_{comb} بازده احتراق تنور است.

$$\dot{Q}_{Exh} = (\dot{m}h)_{Exh} = \left(1 - \frac{\eta_{comb}}{100} \right) \cdot \dot{Q}_F \quad (4)$$

رابطه (۵) قانون اول ترمودینامیک با چشم‌پوشی از انرژی جنبشی و پتانسیل را برای یک تنور نانویی نشان می‌دهد. طبق این قانون (بقای انرژی)، کل مقادیر تلفات حرارتی از جداره‌ها و دهانه تنور و تلفات مربوط به هوای اضافی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۶]:

$$\sum \dot{m}_{in} h_{in} + \dot{Q} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} + \dot{W} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_F - (\dot{Q}_B + \dot{Q}_{Exh}) \quad (6)$$

لازم به ذکر است تلفات مربوط به هوای اضافی با استفاده از معادله واکنش و مقادیر اندازه گیری شده قابل محاسبه است و سهم آن از مقدار

تحلیل گاز (دود) Testo 350 M/XL ساخت کشور آلمان استفاده شده است. این دستگاه می‌تواند غلظت و دمای گازهای خروجی از دودکش و در نهایت بازده احتراق را محاسبه نماید. تلفات محاسبه شده به وسیله این دستگاه شامل تلفات ناشی از گازهای داغ خروجی از دودکش و تلفات مربوط به هوای اضافی است. دستگاه تحلیل گاز با استفاده از رابطه (۱) بازده احتراق را برحسب درصد محاسبه می‌کند [۲۰]:

$$\eta_{comb} = 100 - \left[(FT - AT) \cdot \left(\frac{0.66}{0.21 - O_2\%} + 0.009 \right) \right] \quad (1)$$

دستگاه تحلیل گاز تستو می‌تواند غلظت نیتروژن (NO_x) و مونواکسیدکربن (CO) را به ترتیب تا میزان 3000 ppm و 1000 ppm اندازه‌گیری نماید. همچنین ترموکوپل موجود در این دستگاه تا دمای 1200°C قابلیت تحمل دارد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای اکسیدهای نیتروژن در غلظت‌های کمتر از 100 ppm ، برابر 5 ppm و برای مونواکسیدکربن در غلظت‌های کمتر از 100 ppm ، برابر 10 ppm می‌باشد. در شکل ۲ نمای ظاهری این دستگاه نمایش داده شده است. این دستگاه قابلیت ذخیره و چاپ اطلاعات و انتقال آن‌ها به سیستم‌های کامپیوتری را دارد [۲۰].



Fig. 2. Gas analyzer Testo 350 XL

شکل ۲: نمای ظاهری Testo 350 XL

۳- الگوسازی ریاضی

۳-۱- تحلیل انرژی

سیستم کلی تمام تنورهای نانویی در قالب یک حجم کنترل (از دیدگاه انرژی) در شکل ۳ نشان داده شده است. چنانچه در شکل دیده می‌شود انرژی‌های ورودی به تنور شامل انرژی حاصل از احتراق سوخت و هوا و انرژی خمیر نان می‌باشند. سهم انرژی ورودی توسط خمیر نان و هوا در شرایط استاندارد محیطی تقریباً برابر صفر است. انرژی ورودی به تنور صرف پخت نان و تلفات از جداره‌ها، دهانه تنور و دودکش می‌شود.
نرخ انرژی حاصل از احتراق سوخت طبق رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۰]:

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_F \cdot \sum_i x_i (LHV / MW)_i \quad (2)$$

۳-۲- تحلیل انرژی

سیستم کلی تمام تنوره‌های نانویی در قالب یک حجم کنترل (از دیدگاه انرژی) در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه در شکل دیده می‌شود، انرژی‌های ورودی به تنور شامل انرژی حاصل از سوخت، هوا و خمیر نان می‌باشد. سهم انرژی ورودی توسط خمیر نان و هوا در شرایط استاندارد محیطی تقریباً برابر صفر است. بنابراین انرژی ورودی به تنور تنها شامل انرژی حاصل از سوخت است. انرژی خروجی شامل انرژی منتقل شده به نان و انرژی تلف شده از جداره‌ها، دهانه تنور و دودکش می‌شود. همچنین بخشی از انرژی به دلیل بازگشت ناپذیری‌ها از بین می‌رود.

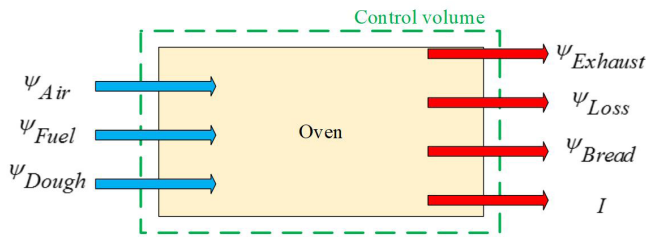


Fig. 5. Exergy balance in oven

شکل ۵: مبادلات انرژی در تنور انواع مختلف نانویی‌ها

۳-۲-۱- انرژی گاز طبیعی

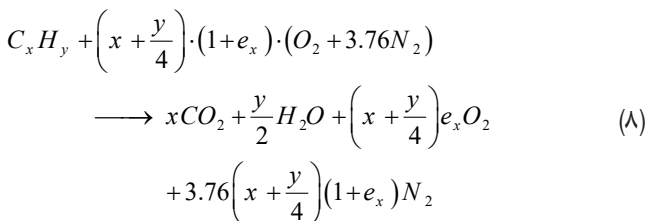
وزن و دینسر [۱۰] یک معادله معتبر برای محاسبه انرژی شیمیایی سوخت‌های مختلف ارائه نموده اند که طبق آن انرژی شیمیایی سوخت بر اساس کسر مولی و انرژی شیمیایی هر یک از اجزای تشکیل دهنده سوخت به دست می‌آید:

$$\psi_F = \sum_i N_{F,i} \cdot \psi_{F, ch,i} \quad (7)$$

در رابطه فوق، $N_{F,i}$ کسر مولی هر یک از اجزای سوخت هیدروکربنی و $\psi_{F, ch,i}$ انرژی شیمیایی هر یک از این اجزا است. مقادیر انرژی شیمیایی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی با توجه به ترکیب آن محاسبه می‌شوند [۱۰، ۲۱ و ۲۲].

۳-۲-۲- انرژی گازهای خروجی از دودکش

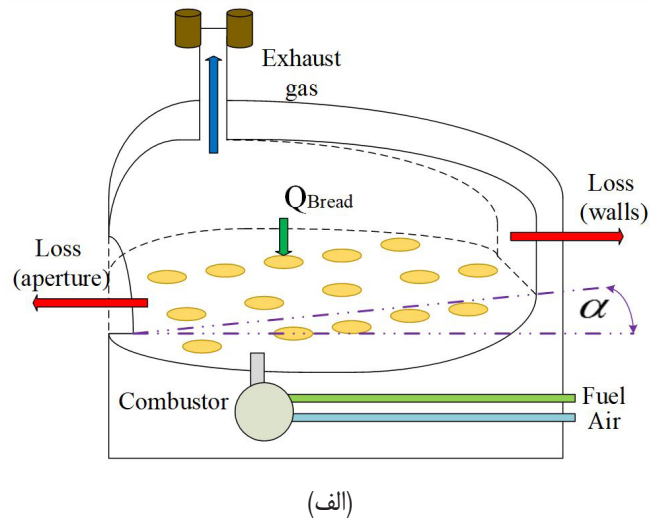
معادله واکنش احتراق سوخت و هوا با مقدار مشخص درصد هوای اضافی e_x و رطوبت نسبی صفر به صورت زیر است [۲۵]:



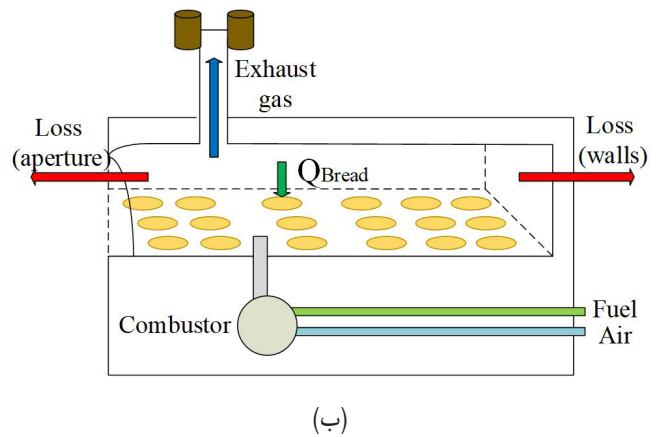
با توجه به ترکیب گاز طبیعی در نظر گرفته شده در کار حاضر، مقادیر x و

فوق تفکیک می‌شود.

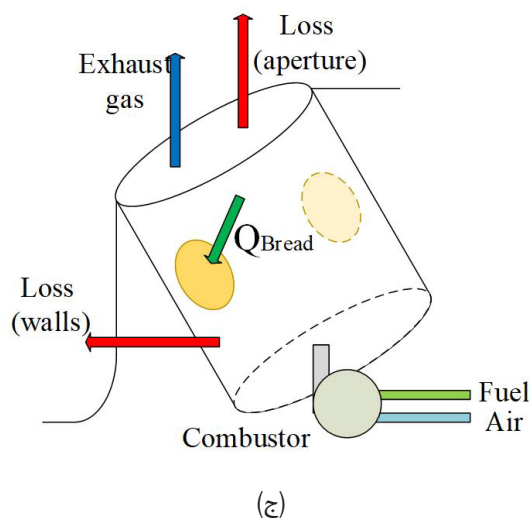
شکل ۴ نمای شماتیک تنوره‌های دست‌پز پخت نان‌های سنتی مسطح (سنگک، بربری و تافتون) را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 4. Schematic diagram of hand baking traditional ovens: (a) San-gak, (b) Barbari, (c) Taftun

شکل ۴: نمای شماتیک تنوره‌های دست‌پز پخت نان‌های سنتی: (الف) سنگک، (ب) بربری و (ج) تافتون

است که سیستم با محیط خود در تعادل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی باشد. تفاوت حالت مرده محدود سیستم و حالت مرده مطلق، مربوط به مقدار معینی کار است که میزان دسترس پذیری شیمیایی نامیده می شود. در رابطه (۱۳)، $p_{i,00}$ فشار جزئی اجزا در حالت مرگ محدود و $p_{i,0}$ فشار جزئی اجزا در حالت مرگ مطلق (فشار محیط) است. درصد مولی اجزای تشکیل دهنده هوا در شرایط محیط در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: درصد مولی اجزا تشکیل دهنده هوا در شرایط محیط [۱۸]

Table 1. Mole fractions of air

$x_{i,0}$	فرمول شیمیایی	اجزای تشکیل دهنده هوا
۰/۰۰۰۳	CO ₂	دی اکسید کربن
۰/۰۱۸۸	H ₂ O	بخار آب
۰/۲۰۵۵	O ₂	نیتروژن
۰/۷۶۶۲	N ₂	اکسیژن
۰/۰۰۹۲	-	بقیه

مطابق رابطه (۱۴)، آگرژی مخصوص گازهای خروجی از دودکش برابر با مجموع آگرژی فیزیکی و شیمیایی مخصوص آن ها است.

$$\psi_{Exh} = \psi_{Exh,ph} + \psi_{Exh,ch} \quad (14)$$

بنابراین با توجه به این که فشار داخل تنور ۱atm است، آگرژی گازهای خروجی از دودکش از رابطه (۱۵) محاسبه می شود. همچنین طراحی تنورهای پخت نان سنگگ و بربری به گونه ای انجام می شود که از محل برداشت نان، دود خارج نشود. بنابراین دبی سوخت و هوای ورودی به تنور از محل مشعل با دبی دودهای خروجی دودکش \dot{m}_{Exh} برابر است.

$$\begin{aligned} \Psi_{Exh} &= \dot{m}_{Exh} \cdot \psi_{Exh} = \dot{m}_{mix} \cdot \psi_{Exh} \\ &= \dot{m}_F \left(1 + \frac{A}{F} \right) \cdot \left[\sum_{i=1}^N x_i \cdot (\bar{h}_{i,T} - \bar{h}_{i,T_0}) \right. \\ &\quad \left. - T_0 \left(\bar{s}_{i,T}^0 - \bar{s}_{i,T_0}^0 - R \ln \frac{x_{i,00}}{x_{i,0}} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

۳-۲-۳ آگرژی منتقل شده از جدارها در اثر تلفات حرارتی

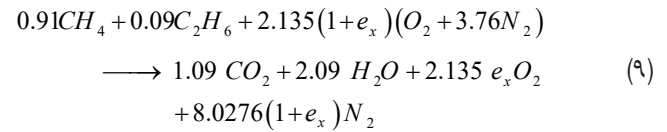
به طور کلی آگرژی حرارتی خالص انتقالی توسط حرارت Q_r از مرز سیستم (صفحه) r در دمای متوسط T_r از رابطه (۱۶) محاسبه می شود [۲۵]:

$$\psi_r = \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \cdot \dot{Q}_r \quad (16)$$

بدین ترتیب آگرژی انتقالی ناشی از تلفات حرارت جدارها از رابطه (۱۷) به دست می آید:

$$\psi_{loss} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_s^m} \right) \cdot \dot{Q}_{loss} \quad (17)$$

y به ترتیب برابر ۱/۰۹ و ۴/۱۸ می باشند و در نتیجه واکنش احتراقی به صورت رابطه (۹) نوشته می شود:



نسبت هم آرزی در واکنش های احتراقی از رابطه (۱۰) محاسبه می شود. در این رابطه، $O_{2,dry}$ درصد اکسیژن موجود در محصولات خشک احتراق است.

$$\phi = 2.135 \cdot \left[\frac{x + \left(1 - \frac{O_{2,dry}}{100} \right) \cdot \left(\frac{y}{4} \right)}{1 - 4.76 \cdot \left(\frac{O_{2,dry}}{100} \right)} \right]^{-1} \quad (10)$$

درصد هوای اضافی در واکنش احتراق با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$e_x = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad (11)$$

آگرژی فیزیکی (ترمو مکانیکی) گازهای حاصل از احتراق سوخت (گاز طبیعی) در دمای دودکش، به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود [۲۵]:

$$\begin{aligned} \psi_{Exh,ph} &= \sum_{i=1}^N x_i \cdot [\bar{h}_{i,T} - \bar{h}_{i,T_0} \\ &\quad - T_0 (\bar{s}_{i,T}^0 - \bar{s}_{i,T_0}^0) + \bar{R} T_0 \cdot \ln \frac{P}{P_0}] \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه فوق، x_i درصد مولی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق، $\bar{h}_{i,T}$ انتالپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای دودکش، \bar{h}_{i,T_0} انتالپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای محیط، $\bar{s}_{i,T}^0$ انتروپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دودکش و \bar{s}_{i,T_0}^0 انتروپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای محیط است. از طرفی R ثابت جهانی گازها بوده و مقدار آن برابر (J/kmol·K) ۸۳۱۵ می باشد.

آگرژی شیمیایی گازهای حاصل از احتراق با رابطه (۱۳) تعریف می شود [۲۶]:

$$\psi_{Exh,ch} = \bar{R} T_0 \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot \ln \frac{P_{i,00}}{P_{i,0}} = \bar{R} T_0 \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot \ln \frac{x_{i,00}}{x_{i,0}} \quad (13)$$

وقتی سیستم با محیط خود در حال تعادل حرارتی و مکانیکی باشد، حالت مرده محدود نامیده می شود. در این حالت به سیستم اجازه داده نمی شود که با محیط خود اختلاط پیدا کند و وارد واکنش شیمیایی شود و مقدار بیشینه کار به دست آمده در این حالت میزان دسترس پذیری ترمو مکانیکی است [۲۷]. دومین حالت مرده، حالت مرده مطلق نامیده می شود که مربوط به موقعی

۳-۲-۴- اگزرژی منتقل شده به نان

طبق رابطه (۱۶)، اگزرژی منتقل شده به نان از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\psi_B = \left(1 - \frac{T_0}{T_B}\right) \cdot \dot{Q}_B \quad (18)$$

۴- کاهش مصرف سوخت

روش‌های عمومی برای کاهش مصرف سوخت تنورها و کوره‌ها عبارتند از کنترل سهم هوای اضافی و جلوگیری از احتراق ناقص سوخت، بازیابی حرارتی گازهای داغ خروجی از تنور و عایق کاری جداره‌های تنور که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۱- کنترل سهم هوای اضافی و جلوگیری از احتراق ناقص سوخت

از عوامل مهم و تأثیرگذار در تلفات حرارتی، هوای اضافی ورودی به واکنش احتراق (مشعل) است. هدف استفاده از هوای اضافی در مشعل، جلوگیری از احتراق ناقص سوخت است. همچنین از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های حاصل از احتراق، مونواکسیدکربن است. مونواکسیدکربن در اثر احتراق ناقص سوخت تولید می‌شود. بنابراین ورود هوای اضافی به احتراق می‌تواند اکسیژن لازم برای احتراق را به‌خوبی تأمین و از تشکیل این نوع آلاینده جلوگیری نماید. اما ورود حجم بالای هوای اضافی می‌تواند باعث کاهش بازده احتراق شود؛ چراکه بخش زیادی از انرژی توسط هوای اضافی از تنور خارج می‌شود و از این نظر نمی‌توان هوای اضافی را بی‌حد و مرز افزایش داد [۲۲]. بنابراین برای اطمینان از سوختن کامل گاز طبیعی و جلوگیری از تولید برخی آلاینده‌ها، وجود مقدار مشخصی هوا در واکنش احتراق لازم است. با توجه به عملکرد مشعل‌های نوین، واکنش احتراقی با ۵٪ هوای اضافی به‌عنوان یک واکنش مناسب و قابل‌انجام از نظر کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌گی‌ها شناخته می‌شود. در کار حاضر نیز برآورهای کاهش مصرف سوخت با در نظر گرفتن ۵٪ هوای اضافی در فرآیند احتراق انجام می‌شود. با کاهش سهم هوای اضافی به ۵٪ در رابطه (۱) و انجام محاسبات تحلیلی، مقدار صرفه‌جویی در مصرف انرژی با کاهش هوای اضافی به‌دست می‌آید. همچنین بدیهی است که با در نظر گرفتن ۵٪ هوای اضافی در واکنش احتراق، به‌طور خودکار از احتراق ناقص سوخت جلوگیری می‌شود.

۴-۲- بازیابی حرارتی گازهای داغ خروجی از تنور

دمای بالای محصولات احتراق نیز مانند هوای اضافی، رفتاری دوگانه دارد. از یک سو با بالا رفتن دما، مونواکسیدکربن موجود در بین محصولات احتراق مجدداً می‌سوزد و موجب افزایش بازده احتراق و کاهش آلاینده‌گی‌های ناشی از مونواکسید کربن می‌شود؛ اما از سوی دیگر، یکی از شرایط تشکیل حرارتی مونواکسیدنیترژن، دمای بالا است و بالا رفتن دما باعث افزایش آلاینده‌گی‌های ناشی از اکسیدهای نیترژن می‌شود [۲۰]. با استفاده از مبدل‌های حرارتی می‌توان گرمای موجود در گازهای داغ دودکش را بازیابی کرد. مطالعات در مورد مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در خروجی دودکش [۲۴] نشان می‌دهند که با بازیابی گرمای گازهای داغ دودکش می‌توان دمای آن‌ها را تا ۱۰۰°C کاهش داد. در کار حاضر نیز برای برآوردهای کاهش مصرف سوخت در صورت استفاده از مبدل حرارتی در خروجی تنور، دمای

۳-۲-۵- تلفات اگزرژی ناشی از بازگشت‌ناپذیری‌ها

قانون دوم ترمودینامیک برای تنور نانوائی به‌صورت رابطه (۱۸) است [۲۶]. در این رابطه، $\sum \Delta Q_{cv}/T$ افزایش انتروپی به وسیله انتقال حرارت، I افزایش انتروپی به دلیل بازگشت‌ناپذیری‌های داخلی (مانند اصطکاک، احتراق و اختلاط گازها)، $\sum \dot{m}_{in} s_{in}$ انتروپی مربوط به جریان جرم ورودی به حجم کنترل، $\sum \dot{m}_{out} s_{out}$ انتروپی مربوط به جریان جرم خروجی از حجم کنترل است.

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} s_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} s_{out} + \sum \frac{\Delta Q_{cv}}{T} + I = 0 \quad (19)$$

با توجه به معادلات (۷) تا (۱۸)، تلفات اگزرژی ناشی از برگشت‌ناپذیری‌ها از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$I = \dot{m}_F \psi_F - \dot{Q}_B \left(1 - \frac{T_0}{T_B}\right) - \sum \dot{Q}_{loss} \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) - \dot{m}_{Exh} \psi_{Exh} \quad (20)$$

۳-۳- بازده انرژی و اگزرژی تنور نانوائی

بازده قانون اول ترمودینامیک به‌صورت نسبت انرژی مورد نیاز برای پخت نان به انرژی حاصل از احتراق گاز طبیعی تعریف و از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود. همچنین بازده قانون دوم ترمودینامیک به‌صورت نسبت اگزرژی منتقل شده به نان در حال پخت به اگزرژی ورودی به تنور در اثر احتراق سوخت و هوا تعریف و با رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{m}_F \cdot h_F} = \frac{1 \cdot \ln_B \left[\frac{m_d \cdot c_{p,d} \Delta T + (m_d - m_B) h_{fg}}{\Delta t} \right]}{\dot{m}_F \cdot h_F} \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_B \left(1 - \frac{T_0}{T_B}\right)}{\dot{m}_F \psi_F} = \frac{1 \cdot \ln_B \frac{m_d \cdot c_{p,d} \cdot \Delta T + (m_d - m_B) h_{fg}}{\Delta t} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_B}\right)}{\dot{m}_F \cdot \left(\sum_i N_{F,i} \cdot \psi_{F,exh,i} \right)} \quad (22)$$

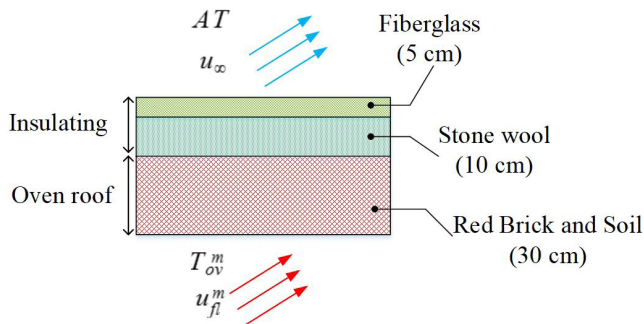


Fig. 7. Schematic diagram of roof insulating in ovens

شکل ۷: نمای شماتیک سقف عایق کاری شده انواع مختلف نانویی های دست پز

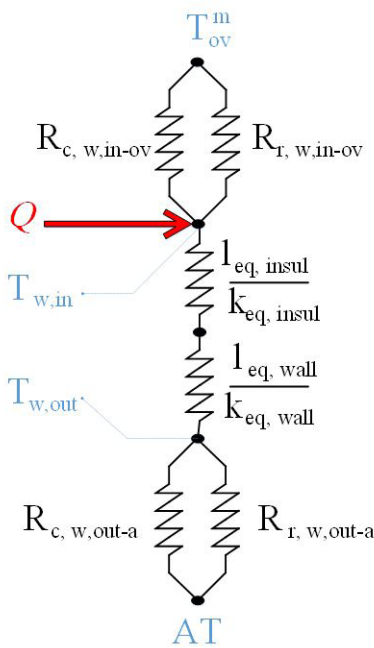


Fig. 8. Heat loss thermal resistance diagram in different walls

شکل ۸: مدار مقاومتی تلفات حرارتی از جداره های تنور.

$$U = \frac{1}{R_{w,in-ov} + \frac{l_{eq,insul}}{k_{eq,insul}} + \frac{l_{eq,wall}}{k_{eq,wall}} + R_{w,out-a}} \quad (23)$$

به منظور ساده سازی محاسبات، فرض می شود انتقال حرارت تشعشی بین سطوح داخلی و بیرونی تنور، به ترتیب با سطوحی با دمای متوسط تنور و دمای محیط انجام می گیرد. به این ترتیب در رابطه فوق، $R_{w,in-ov}$ مقاومت حرارتی (تشعشی و جابه جایی) بین سطح داخلی تنور و گازهای داغ داخل تنور و $R_{w,out-a}$ مقاومت حرارتی (تشعشی و جابه جایی) بین سطح بیرونی تنور و هوای محیط است. همچنین $k_{eq,insul}$ و $k_{eq,wall}$ به ترتیب ضریب هدایت حرارتی مؤثر دیوار تنور نانویی و مجموعه عایق های استفاده شده هستند. با استفاده از رابطه های (۲۳) و (۲۴) رابطه (۲۲) تکمیل می شود [۲۴]:

گازهای خروجی از مبدل حرارتی 100°C فرض شده است.

۳-۴- عایق کاری جداره ها

با توجه به اینکه شرایط عایق کاری و تنورهای مختلف به دلیل دما و شرایط کاری گوناگون آن ها بسیار با یکدیگر متفاوت است، نمی توان از نتایج مربوط به عایق کاری سایر کوره ها برای دیگر واحدها استفاده نمود. بنابراین برخلاف راهکارهای مربوط به کنترل هوای اضافی و بازیابی گازهای داغ خروجی از دودکش که با توجه به پیشنهادات پژوهش های گذشته انتخاب شدند، برای جلوگیری از تلفات جداره ها یک نمونه عایق کاری مناسب در کار حاضر پیشنهاد و در یک واحد نانویی اجرا می شود و سپس با توجه به نتایج مربوط به این عایق کاری، برای سایر نانویی ها برآورد کاهش مصرف سوخت در اثر عایق کاری جداره ها ارائه می شود.

نمونه این عایق کاری مناسب برای دیوارهای جانبی انواع تنورهای نانویی در شکل ۶ و برای سقف تنور در شکل ۷ نشان داده شده است. جداره های (دیوار و سقف) تنور در شرایط معمولی شامل 30 cm آجر نسوز است. عایق کاری دیوار تنور شامل 10 cm پشم سنگ، 5 cm پشم شیشه و یک ردیف 10 cm آجر نسوز است. همچنین عایق کاری سقف تنور به این صورت است که لایه های 10 cm پشم سنگ و 5 cm پشم شیشه روی سقف بیرونی به طور کامل گسترده می شوند.

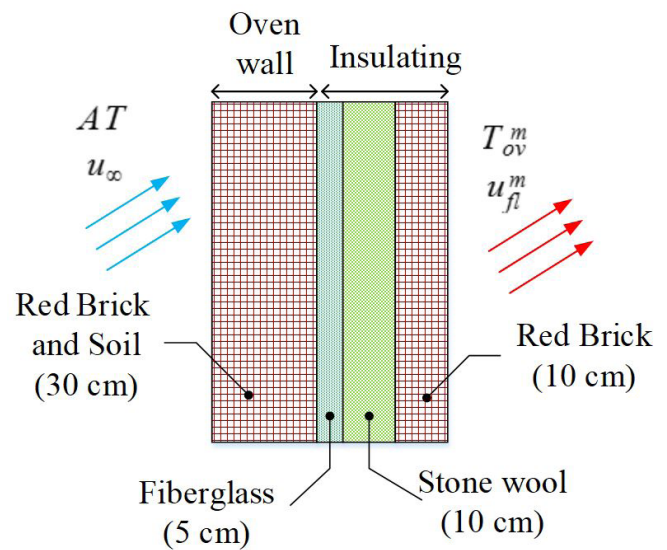


Fig. 6. Schematic diagram of side-wall insulating in ovens

شکل ۶: نمای شماتیک دیوار عایق کاری شده انواع مختلف نانویی های دست پز

شکل ۸، نمودار مقاومتی تلفات حرارتی از جداره های تنور را نشان می دهد. همچنین با توجه به مشخصه های ترموفیزیکی مصالح به کار رفته در جداره ها (دیوار و سقف نانویی و عایق ها)، گازهای داغ داخل تنور و هوای محیط، مقاومت حرارتی کلی بخش های مختلف جداره تنور با رابطه (۲۲) محاسبه می شود.

مادون قرمز، چندین مرتبه و با دقت اندازه‌گیری شده است. سپس برای هر کدام از جداره‌های داخلی و بیرونی یک دمای میانگین معرفی می‌شود. شکل ۹ برخی نتایج اندازه‌گیری‌های دما برای جداره‌های داخلی انواع نانوائی‌های دست‌پز سنتی را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش‌ها در مورد تحلیل گازهای خروجی از دودکش (آلاینده‌گی‌ها) و بازده احتراق تنور نانوائی‌های دست‌پز سنتی در جدول ۲ نشان داده شده است. دمای آدیاباتیک احتراق در این جدول، با استفاده از نرم‌افزار گسکیو محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که بازده احتراق تنورهای نانوائی سنگ و بربری در حدود ۷۰٪ و بازده احتراق تنور نانوائی تافتون در حدود ۴۳٪ است. همچنین جدول ۳ نتایج تحقیقات میدانی و آزمایش‌ها در مورد ویژگی‌های نانوائی‌های دست‌پز سنتی، مصرف گاز طبیعی، مشخصات فیزیکی نان‌ها و همچنین نتایج میانگین‌گیری‌های تحلیلی از دمای جداره‌های داخلی تنور را نشان می‌دهد.

۵-۲- تحلیل انرژی

با توجه به داده‌های جدول‌های ۲ و ۳ و روابط (۲) تا (۶)، موازنه انرژی برای انواع تنورهای نانوائی دست‌پز سنتی انجام می‌شود که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. طبق نتایج این جدول مشاهده می‌شود که تلفات حرارتی در تنور نان تافتون نسبت به نان‌های سنگ و بربری بسیار بیشتر است؛ این در حالی است که انرژی مورد نیاز برای پخت نان‌های تافتون، بربری و سنگ به هم نزدیک است.

$$R_{w,out-a} = [h_{r,w,out-a} + h_{c,w,out-a}]^{-1} = \left[\frac{\sigma \varepsilon_w \cdot (T_{w,out}^2 - AT^2)(T_{w,out}^2 + AT^2)}{T_{w,out} - AT} + \frac{0.0296 \cdot k_a \cdot Re_x^{4/5} \cdot Pr^{1/4}}{3} \right]^{-1} \quad (24)$$

$$R_{w,in-ov} = [h_{r,w,in-ov} + h_{c,w,in-ov}]^{-1} = \left[\frac{\sigma (T_{w,in} + T_{ov}^m)(T_{w,in}^2 + (T_{ov}^m)^2)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_{ov}} - 1} + \frac{0.0296 \cdot k_a \cdot Re_x^{4/5} \cdot Pr^{1/4}}{L} \right]^{-1} \quad (25)$$

۵- ارائه نتایج و بحث

در این قسمت نتایج آزمایش‌های تجربی، تحقیقات میدانی و محاسبات تحلیلی برای تعیین بازده انرژی و انرژی تنورهای دست‌پز نانوائی‌های سنگ، بربری و تافتون ارائه می‌شود. در پایان بر اساس این نتایج راهکارهایی برای کاهش مصرف گاز طبیعی و بهینه‌سازی تنورهای دست‌پز پخت نان سنتی مسطح ارائه می‌شود.

۵-۱- نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی

در کار حاضر دمای قسمت‌های مختلف داخل و بیرون تنور انواع نانوائی‌های سنگ، بربری و تافتون با استفاده از دستگاه دماسنج غیرتماسی

جدول ۲: نتایج آزمایش‌ها در مورد تحلیل گازهای خروجی از دودکش و بازده احتراق تنورهای نانوائی دست‌پز سنتی

Table 2. Analysis of flue gases and combustion efficiency for different bakeries with TESTO gas analyzer

η_{comb} (%)	FT (°C)	AT (°C)	T_{ad} (°C)	NO_x (ppm)	NO_2 (ppm)	NO (ppm)	CO (ppm)	CO_2 (%)	O_2 (%)	داده‌ها نانوائی
۶۸/۸	۳۴۱/۳	۱۹/۹	۹۶۶/۸	۲۶/۰	۰/۶	۲۶/۰	۲۷۰/۰	۴/۲۴	۱۳/۵۲	سنگ
۶۷/۴	۲۵۶/۲	۱۶/۹	۷۱۵/۱	۵/۰	۱/۳	۳/۰	۳۸۵/۰	۲/۹۴	۱۵/۸۱	بربری
۴۳/۰	۲۸۷/۶	۲۰/۶	۸۱۵/۳	۱۰/۰	۰/۹	۱۰/۰	۱۲/۰	۱/۸۳	۱۷/۷۷	تافتون

جدول ۳: نتایج آزمایش‌ها در مورد ویژگی‌های نان‌های دست‌پز سنتی

Table 3. Experimental results about features of different breads

T_s^r (°C)	T_s^b (°C)	T_{ov}^m (°C)	A_B (m ²)	L_B (m)	n_B	Δt (s)	m_B (kg)	m_d (kg)	\dot{V}_F (m ³ /hr)	داده‌ها نانوائی
۳۶۵	۴۰۰	۳۹۰	۰/۱۷	۰/۶۳	۲۹	۱۲۰۰	۰/۴۵	۰/۶۰	۶/۱	سنگ
۲۸۵	۴۱۰	۳۷۰	۰/۱۵	۰/۰۹	۲۴	۷۲۰	۰/۴۴	۰/۶۳	۸/۳	بربری
۳۵۵	۳۵۵	** ۳۵۵	۰/۳۹	۰/۵۰	۲۰	۳۶۰	۰/۱۳	۰/۱۷	۲۰/۲	تافتون

* منظور از دمای متوسط سقف تنور در مورد نانوائی‌های سنگ و بربری دمای متوسط مجموعه دیواره‌ها و سقف است؛ اما با توجه به این که در مورد نانوائی تافتون وجود سقف مفهومی ندارد، عبارت متوسط دمای سقف صرفاً به دمای متوسط دیواره‌ها مربوط می‌شود.

جدول ۴: نتایج موازنه انرژی برای تنورهای نانوبی سنتی

Table 4. Energy balance results for different ovens

\dot{Q}_{loss} (kW)	\dot{Q}_{Exh} (kW)	\dot{Q}_B (kW)	\dot{Q}_F (kW)	کمیت نانوبی
۲۸/۹	۱۸/۷	۱۲/۳	۶۰/۰	سنگک
۴۶/۲	۲۷/۰	۹/۶	۸۲/۸	بربری
۷۵/۳	۱۱۴/۰	۱۰/۷	۲۰۰/۰	تافتون

۵-۳- تحلیل انرژی

اطلاعات مربوط به اجزای تشکیل دهنده محصولات احتراق و درصد هوای اضافی در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین جدول ۶ خواص گازهایی خروجی از دهانه (دودکش) تنور نانوبی‌های دست‌پز سنتی را نشان می‌دهد. جدول ۷ محاسبات انرژی برای نانوبی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهند که تلفات حرارتی از دودکش تنورهای سنگک، بربری و تافتون کیفیت بازیابی ترمودینامیکی پایینی دارند (حدوداً بین ۱۲٪ تا ۱۸٪ انرژی ورودی به تنور)؛ این در حالی است که سهم تلفات انرژی از دودکش نیز چندان بالا نیست (حدود ۹٪ تا ۱۳٪ انرژی ورودی به تنور). بنابراین با وجود سهم نسبتاً پایین انرژی تلف‌شده از دودکش تنورهای دست‌پز سنتی، بازیابی حرارتی این مقدار انرژی به‌صرفه نیست و توصیه نمی‌شود.

همچنین نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهند که تلفات حرارتی از جداره‌های تنورهای سنگک، بربری و تافتون کیفیت بازیابی ترمودینامیکی مناسبی دارند (حدوداً بین ۲۵٪ تا ۳۲٪ انرژی ورودی به تنور). بنابراین با وجود سهم بالای انرژی تلف‌شده از جداره‌های تنورهای سنتی دست‌پز (حدود ۳۸٪ تا ۵۷٪ انرژی ورودی به تنور) و همچنین کیفیت بازیابی حرارتی مناسب آن، عایق‌کاری تنورهای دست‌پز سنتی راهکار مناسبی برای کاهش مصرف سوخت در این واحدها است.

از سوی دیگر با توجه به نقش هوای اضافی در افزایش بازگشت‌ناپذیری‌ها که حدوداً ۶۰٪ انرژی ورودی با تنور انواع نانوبی‌ها را نابود می‌نماید، کاهش سهم هوای اضافی توصیه می‌شود.

۵-۴- بازده انرژی و انرژی تنورهای نانوبی

جدول ۸ نتایج محاسبات در مورد بازده انرژی و انرژی تنورهای نانوبی دست‌پز سنتی معمولی را نشان می‌دهد. طبق نتایج این جدول مشاهده می‌شود که بازده انرژی و انرژی تمام تنورهای نانوبی بسیار پایین است. در این بین بازده انرژی و انرژی تنور نانوبی تافتون از سایر تنورها کمتر است (حدوداً یک‌دوم تنور نانوبی بربری و یک‌چهارم تنور نانوبی سنگک). این وضعیت نشان دهنده شرایط نابه‌هنجار تنورهای دست‌پز سنتی پخت نان در ایران و اهمیت بهبود شرایط و بهینه‌سازی آن‌ها است.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 9. Some measurements images for different ovens: (a) Sangak, (b) Barbari, (c) Taftun

شکل ۹: برخی نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای قسمت‌های مختلف داخلی تنور نانوبی‌های دست‌پز سنتی (الف) سنگک، (ب) بربری و (ج) تافتون

جدول ۵: اطلاعات مربوط به اجزای تشکیل دهنده محصولات احتراق و درصد هوای اضافی

Table 5. Combustion products detail for different ovens

e_x (%)	ϕ	$n_i (x_i)$				داده‌ها نانویی
		N_2	O_2	H_2O	CO_2	
۱۶۲	۰/۳۸	۲۱/۰۳ (۰/۷۶۰)	۳/۴۶ (۰/۱۲۵)	۲/۰۹ (۰/۰۷۵۶)	۱/۰۹ (۰/۰۳۹۴)	سنگ
۲۷۳	۰/۲۷	۲۹/۹۳ (۰/۷۶۹)	۵/۸۳ (۰/۱۵۰)	۲/۰۹ (۰/۰۵۳۷)	۱/۰۹ (۰/۰۲۸۰)	بربری
۴۹۲	۰/۱۷	۴۷/۵۵ (۰/۷۷۶)	۱۰/۵ (۰/۱۷۲)	۲/۰۹ (۰/۰۳۴۱)	۱/۰۹ (۰/۰۱۷۸)	تافتون

جدول ۶: خواص گازهای خروجی از دهانه (دودکش) تنور نانویی‌های دست‌پز سنتی [۱۹]

Table 6. Exhausted gas properties for different ovens

$T_{Exh} = FT$		$T_0 = AT$		کمیت‌ها اجزای دود خروجی از دودکش	نانویی‌ها
$\bar{S}_{i,T}^0$ (kJ/kmol.K)	$\bar{h}_{i,T}$ (kJ/kmol)	\bar{S}_{i,T_0}^0 (kJ/kmol.K)	\bar{h}_{i,T_0} (kJ/kmol)		
۲۴۴/۳	-۳۸۰۲۶۷	۲۱۳/۰۴	-۳۹۳۷۱۶	CO_2	سنگ
۲۱۳/۸۱	-۲۳۳۸۲۱	۱۸۸/۰۵	-۲۴۱۹۵۷	H_2O	
۲۲۷/۱	۹۷۲۳/۵	۲۰۴/۴۶	-۱۴۳/۲۴	O_2	
۲۱۲/۷۸	۹۳۴۳/۸۵	۱۹۰/۹۳	-۱۴۳/۵	N_2	
۲۳۷/۳۵	-۳۸۴۰۷۱	۲۱۳/۸۷	-۳۹۳۴۵۸	CO_2	بربری
۲۰۸/۴۲	-۲۳۶۰۸۰	۱۸۸/۸۲	-۲۴۱۷۹۳	H_2O	
۲۲۲/۳۵	۷۰۴۴/۱	۲۰۵/۲۳	۵۳/۴	O_2	
۲۰۸/۳	۶۸۱۵/۵	۱۹۱/۶	۵۳/۶	N_2	
۲۳۹/۸۶	-۳۸۲۷۳۱	۲۱۴	-۳۹۳۴۷۸	CO_2	تافتون
۲۱۰/۳۸	-۲۳۵۲۸۵	۱۸۸/۹۲	-۲۴۱۸۰۳	H_2O	
۲۲۴/۱	۷۹۹۱/۲	۲۰۵/۲۴	۵۳/۹	O_2	
۲۰۹/۹۳	۷۷۱۱	۲۰۵/۲۲	۵۴	N_2	

جدول ۷: محاسبات انرژی برای نانویی‌های دست‌پز سنتی

Table 7. Exergy calculating data

I (kW)	Ψ_B (kW)	Ψ_{loss} (kW)	Ψ_{Exh} (kW)	Ψ_{Exh} (kJ/kmol)	$\Psi_{Exh,ch}$ (kJ/kmol)	$\Psi_{Exh,ph}$ (kJ/kmol)	Ψ_F (kW)	Ψ_F (kJ/kmol)	داده‌ها نانویی
۳۴۱/۳	۱۹/۹	۹۶۶/۸	۲۶/۰	۰/۶	۲۶/۰	۲۷۰/۰	۴/۲۴	۱۳/۵۲	سنگ
۲۵۶/۲	۱۶/۹	۷۱۵/۱	۵/۰	۱/۳	۳/۰	۳۸۵/۰	۲/۹۴	۱۵/۸۱	بربری
۲۸۷/۶	۲۰/۶	۸۱۵/۳	۱۰/۰	۰/۹	۱۰/۰	۱۲/۰	۱/۸۳	۱۷/۷۷	تافتون

۵-۵- کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده تنور

با توجه به موازنه انرژی و انرژی انجام گرفته در تنور انواع نانویی‌های دست‌پز سنتی، مشاهده می‌شود که سهم عمده تلفات انرژی تنور از طریق دودکش (ناشی از هوای اضافی و گازهای داغ خروجی) و جداره‌های تنور اتفاق می‌افتد. جدول ۹، سهم گونه‌های مختلف تلفات حرارتی را در انواع تنورهای دست‌پز سنتی پخت نان نسبت به انرژی ورودی به تنور نشان می‌دهد.

جدول ۸: بازده انرژی و انرژی تنورهای دست‌پز سنتی معمولی

Table 8. Exergy balance results for different ovens

بازده (%)	نانویی		
	تافتون	بربری	سنگ
انرژی	۵/۳۵	۱۱/۶	۲۰/۵
انرژی	۱/۱۴	۲/۶	۴/۴۴



(الف)



(ب)

Fig. 11. Some images for roof insulating in Sangak oven: (a) before and (b) after of optimization

شکل ۱۱: نمونه تصاویر (الف) قبل و (ب) بعد از عایق کاری سقف تنور نانوائی سنگ مورد آزمایش در کار حاضر

کاهش میانگین ضریب انتقال حرارت کلی جداره‌های تنور می‌تواند میانگین دمای جداره‌های خارجی را تا حدود 5°C بالاتر از دمای محیط، کاهش دهد. مقایسه متوسط روزانه مصرف سوخت این واحد نانوائی سنگ قبل و بعد از عایق کاری نشان می‌دهد که در شرایط یکسان عملکرد واحد نانوائی از نظر مقدار تولید نان، در حدود ۲۸٪ در مصرف سوخت مصرفی این واحد صرفه‌جویی شده است (جدول ۱۰).

جدول ۱۰: مقایسه متوسط روزانه مصرف گاز طبیعی واحد نانوائی سنگ مورد آزمایش در شرایط قبل و بعد از عایق کاری

Table 10. Gas consumption compression

شرایط تنور	قبل از عایق کاری	بعد از عایق کاری
مصرف سوخت (m^3/day)	۱۱۴/۹	۸۳/۳

۵-۲- برآورد کاهش مصرف سوخت در واحدهای نانوائی با توجه به نتایج مربوط به واحد نانوائی مورد آزمایش مشخص شد که با انجام عایق کاری مذکور، دمای جداره‌های خارجی تا حدود 5°C بالاتر از دمای محیط کاهش می‌یابد. از این نتیجه برای برآورد کاهش مصرف سوخت

جدول ۹: سهم تلفات حرارتی در انواع تنورهای دست‌پز سنتی

Table 9. Heat loss portions in different ovens

Q (%)	نانوائی		
	سنگ	بربری	تافتون
هوای اضافی	۱۸/۵	۲۵/۲	۵۰/۸
گازهای داغ خروجی	۱۳/۳	۸/۵	۱۱/۹
جداره‌های تنور	۴۸/۳	۵۷/۲	۳۷/۷

از آن جایی که انرژی لازم برای پخت نان مقداری ثابت و غیر قابل تغییر است، با کاهش سهم تلفات انرژی می‌توان در راستای کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده انرژی و انرژی تنورهای نانوائی گام برداشت. راه حل‌های مناسب برای کاهش بازگشت‌ناپذیری‌های حاصل از احتراق در مشعل، کاهش هوای اضافی ورودی به مشعل است.

از سوی دیگر، با کاهش سهم هوای اضافی و بازایی حرارتی گازهای داغ خروجی از دودکش، تلفات انرژی از دودکش کاهش می‌یابد. همچنین با عایق کاری جداره‌های تنور، از تلفات انرژی جداره‌ها کاسته می‌شود.

۵-۱- انجام عایق کاری برای یک واحد نانوائی سنگ

برای اجرای عملیات عایق کاری معرفی شده در شکل‌های ۶ و ۷، یک واحد نانوائی سنگ دست‌پز واقع در شهرستان قم برای مدت ۳ روز از تاریخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۶ لغایت ۱۳۹۵/۰۱/۲۸ در اختیار گرفته شد. پس از انجام عایق کاری بار دیگر این واحد مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفت. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تصاویر نمونه دیوار جانبی و سقف تنور را قبل و بعد از عایق کاری نشان می‌دهد.

طبق نتایج آزمایش‌ها و محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه‌های (۲۲) تا (۲۳) برای این واحد نانوائی مشخص شد که عایق کاری انجام شده، با



(ب)



(الف)

Fig. 10. Some images for side-walls insulating in Sangak oven: (a) before and (b) after of optimization

شکل ۱۰: نمونه تصاویر (الف) قبل و (ب) بعد از عایق کاری دیوارهای جانبی تنور نانوائی سنگ مورد آزمایش در کار حاضر

جدول ۱۳: برآورد مقدار حجم سالیانه قابل صرفه‌جویی گاز طبیعی در تنوره‌های نانوایی دست‌پز سنتی

Table 13. Annual gas consumption of different bakeries

نانوایی	سنگک	بربری	تافتون
$V_{save} (m^3)$	۱۹۶۳۳	۱۷۴۰۰	۶۸۶۶۴
درصد صرفه‌جویی	۵۸	۶۶	۸۲

جدول ۱۴ مقدار افزایش بازده انرژی و انرژی تنور انواع مختلف تنوره‌های نانوایی را پس از عایق کاری، کنترل هوای اضافی و بازیابی گرمایی دودکش نشان می‌دهد.

جدول ۱۴: افزایش بازده انرژی و انرژی تنوره‌های مختلف نانوایی در صورت عایق کاری، کنترل هوای اضافی و بازیابی انرژی گازهای داغ خروجی از دودکش

Table 14. Energy and exergy efficiencies enhancement

بازده (%)	نانوایی		
	سنگک	بربری	تافتون
انرژی	۱۴۱/۰	۱۹۳/۳	۴۶۵/۷
انرژی	۱۳۸/۱	۱۸۵/۸	۴۵۵/۳

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با تکیه بر آزمایش‌های تجربی و محاسبات تحلیلی، انواع مختلف تنوره‌های دست‌پز پخت نان‌های سنتی مسطح از نظر قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک تحلیل شدند. بر اساس نتایج سهم عمده انرژی ورودی به تنور از طریق جداره‌ها، دهانه تنور و دودکش تلف می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بازده انرژی تنوره‌های دست‌پز پخت نان‌های سنگک، بربری و تافتون، به‌ترتیب در حدود ۲۱٪، ۱۲٪ و ۵٪ است. در تنوره‌های نانوایی سنگک و بربری، تلفات حرارتی از جداره‌ها در حدود بیش از ۵۰٪ انرژی ورودی است؛ در حالی که تلفات حرارتی از طریق دودکش تنور این نانوایی‌ها کمی بیش از ۳۰٪ می‌باشد. در تنور نانوایی تافتون در حدود ۶۰٪ انرژی ورودی از طریق دهانه تنور و حدود ۴۰٪ آن از طریق جداره‌های تنور تلف می‌شود. از سوی دیگر، تحلیل انرژی نشان می‌دهد که در مورد انواع نانوایی‌ها، انرژی تلف‌شده از دودکش تنور از لحاظ ترمودینامیکی کیفیت بالایی ندارد. سهم اصلی تلفات انرژی در نانوایی‌های مختلف در اثر احتراق سوخت و تلفات حرارتی از جداره‌های تنور و در حدود ۹۰٪ انرژی ورودی است.

در کار حاضر به‌عنوان راهکارهای مناسب و قابل اجرا برای کاهش تلفات حرارتی، عایق کاری جداره‌های تنور و کاهش هوای اضافی پیشنهاد شد. با اجرای عایق کاری برای تنوره‌های نانوایی مشخص شد که می‌توان از حدود ۶۵٪ تلفات حرارتی جداره‌ها جلوگیری نمود. همچنین با انجام محاسبات تحلیلی مشخص شد که به‌دلیل سهم بسیار بالای هوای اضافی موجود

در سایر واحدهای نانوایی استفاده می‌شود. به این ترتیب میانگین ضریب انتقال حرارت کلی جداره‌ها قبل و بعد از عایق کاری مشخص می‌شوند. جدول ۱۱ نتایج مربوط به این محاسبات را گزارش می‌نماید. شایان ذکر است که محاسبات مربوط به این جدول برای یک دمای متوسط برای تمام جداره‌های تنور انجام شده که با توجه به نتایج جدول ۲ و مساحت جداره‌ها مشخص شده است. بدین ترتیب برای تمام جداره‌های تنور یک ضریب افت حرارتی متوسط به‌دست می‌آید و می‌توان در یک مرحله تلفات حرارتی از جداره‌ها را محاسبه نمود.

جدول ۱۱: میانگین دمای سطوح بیرونی جداره‌های تنور و میانگین ضریب انتقال حرارت کلی جداره انواع مختلف تنوره‌های نانوایی

Table 11. Wall temperatures of different ovens

مشخصات	تنوره‌های نانوایی	سنگک	بربری	تافتون
قبل از عایق کاری	$T_{w,out}^m (°C)$	۹۸/۹	۷۸/۱	۵۲/۱
بعد از عایق کاری	$U (W/m^2)$	۱۲۸/۳۶	۹۷/۲۱	۴۵/۲۹
قبل از عایق کاری	$T_{w,out}^m (°C)$	۲۵/۱	۲۲/۱	۲۵/۸
بعد از عایق کاری	$U (W/m^2)$	۴۵/۵۴	۳۴/۴۹	۱۶/۰۷

در نهایت برآورد می‌شود که با انجام عایق کاری جداره‌ها، کنترل هوای اضافی تا ۵٪ و بازیابی گازهای داغ حاصل از احتراق تا دمای ۱۰۰°C، مقدار سوخت قابل صرفه‌جویی در واحدهای نانوایی سنگک، بربری و تافتون، به‌ترتیب در حدود ۵۹٪، ۶۶٪ و ۸۲٪ است که جزئیات این محاسبات در جدول ۱۲ ارائه شده است.

همچنین با توجه به ساعت‌های کاری روزانه واحدهای نانوایی و تعداد روزهای کاری این واحدها در طول سال، برآورد مقدار صرفه‌جویی سالیانه در مصرف سوخت برای واحدهای مختلف نانوایی مشخص می‌شود. جدول ۱۳ نتایج این محاسبات را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲: مقدار قابل صرفه‌جویی گاز طبیعی بر اثر عایق کاری، کنترل هوای اضافی و بازیابی انرژی گازهای داغ خروجی از دودکش در تنوره‌های نانوایی دست‌پز سنتی

Table 12. Savable natural gas for each oven

نانوایی	\dot{V}_F (%)		
	سنگک	بربری	تافتون
کنترل هوای اضافی	۱۸/۱	۲۴/۸	۵۰/۳
بازیابی گازهای داغ خروجی	۹/۳	۵/۱	۷/۷
عایق کاری	۳۱/۱	۳۶/۰	۲۴/۳
کل	۵۸/۴	۶۵/۹	۸۲/۳

t	زمان، s
U	ضریب انتقال حرارت کلی، $W.m^{-2}$
V	دبی حجمی، $m^3.s^{-1}$
x	کسر مولی

علامت یونانی

ε	بازده قانون دوم ترمودینامیک
η	بازده قانون اول ترمودینامیک
σ	ثابت استفان-بولتزمن، $J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$
ϕ	نسبت هم‌ارزی، بی‌بعد
Ψ	اگرژی، kW
ψ	اگرژی ویژه، $kJ.kmol^{-1}$

زیرنویس

a	محیط (هوا)
B	نان
c	جابه‌جایی (مکانیزم انتقال حرارت)
d	چانه خمیر
F	سوخت
ov	تنور
r	تشعشع (مکانیزم انتقال حرارت)
s	سطح داخلی تنور
w	جداره (دیوار و سقف)

بالانویس

b	کف تنور
m	متوسط (میانگین)
r	سقف تنور

تشکر و قدردانی

از مرکز امور پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز استان قم به‌خاطر پشتیبانی و حمایت همه‌جانبه در انجام این پژوهش سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] FAOSTAT and Production, Food and agriculture organization of the united nations, 2010, Roma, Italy, (2016). (In Persian)
- [2] S. Daneshgar, Statistics of bakery units in Iran during 2004 to 2011, *Grains Research Center of Iran*, (2011). (In Persian)

در تنورهای نانوائی، با کاهش هوای اضافی ورودی به مشعل تا ۵٪ تلفات حرارتی در اثر هوای اضافی را تا حدود ۹۷٪ کاهش داد. از سوی دیگر، طبق نتایج بازیابی حرارتی گازهای داغ خروجی از تنور تا دمای $100^{\circ}C$ ، تلفات حرارتی از دودکش را برای نانوائی‌های سنگگ، بربری و تافتون، به‌ترتیب حدود ۷۱٪، ۶۱٪ و ۶۵٪ کاهش می‌دهد؛ اما با توجه با سهم نه‌چندان زیاد این بازیافت، استفاده از مبدل حرارتی برای بازیابی حرارتی گازهای داغ خروجی از تنور پیشنهاد نمی‌شود. در نهایت مشخص شد با انجام عایق‌کاری جداره‌ها، کاهش هوای اضافی به ۵٪ و بازیابی گازهای داغ خروجی از تنور می‌توان بازده انرژی و اگرژی تنورهای نانوائی را افزایش و مصرف گاز طبیعی در آن‌ها را کاهش داد. کاهش سالیانه مصرف گاز طبیعی برای نانوائی‌های دست‌پز پخت نان‌های سنگگ، بربری و تافتون بر اثر اجرای راهکارهای کاهش مصرف انرژی ارائه شده در کار حاضر، به‌ترتیب در حدود ۵۸٪، ۶۶٪ و ۸۲٪ است.

فهرست علائم

A	جرم هوا، kg
AT	دمای محیط، $^{\circ}C$
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
e_x	هوای اضافی، درصد
F	جرم سوخت، kg
FT	دمای گازهای خروجی از دودکش، $^{\circ}C$
h	انتالپی، $kJ.kmol^{-1}$
I	برگشت‌ناپذیری، kW
k	ضریب هدایت حرارتی، $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
L	طول، m
l	ضخامت جداره، m
LHV	ارزش حرارتی پایین، $kJ.kmol^{-1}$
MW	جرم مولکولی، $kg.kmol^{-1}$
m	دبی جرمی، $kg.s^{-1}$
P	فشار، $N.m^{-2}$
Pr	عدد پرانتل، بی‌بعد
Q	شار حرارتی، kW
R	مقاومت حرارتی، $m^2.^{\circ}C.W^{-1}$
R	ثابت جهانی گازها، $J.kmol^{-1}.^{\circ}C$
Re	عدد رینولدز، بی‌بعد
s	انترپی، $kJ.kmol^{-1}.^{\circ}C$
T	دما، $^{\circ}C$

- of steel production processes, *Materials Transactions*, 43(3) (2002) 379-384.
- [14] L. Acevedo, S. Usón, J. Uche, Exergy transfer analysis of an aluminum holding furnace, *Energy Conversion and Management*, 89 (2015) 484-496.
- [15] Z. Arasti, Discipline design of standardization of bakery units in Iran, *Grain Research Center of the Islamic Republic of Iran*, 1389(12), (2013). (In Persian)
- [16] Thermometer ST-9861, Instruction manual handbook.
- [17] Testo M/XL350, Instruction manual handbook.
- [18] ISIRI 5650: *Bakery equipment's- safety and sanitation requirements*, 1st Ed., Institute of Standards and Industrial Research of Iran, (2002). (In Persian)
- [19] S.R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, McGraw Hill International Edition, 3rd ed., New York (2002).
- [20] O.O. Oladunmoye, A. Ojo, R. Akinoso, C.T. Akanbi, Thermo physical Properties of Composite Bread Dough with Maize and Cassava Flours, *International Journal of Food Science and Technology*, 45 (2010) 587-593.
- [21] Y.A. Cengel, *Heat transfer, a practical approach*, McGraw Hill science engineering math, New York (2002).
- [22] N. Sato, *Chemical energy and exergy*, Elsevier science & technology books, Chapter 8, 9, 10, 11 (2004).
- [23] D.E. Winterbone, *Advanced thermo dynamics for engineers*, Wiley, (1997) 36-82.
- [24] J.S. Arons, H.D. Koohi, K. Sankaranarayanan, *Efficiency and sustainability in the energy and chemical industries*, Marcel Dekker, New York, (2004) 200-250.
- [25] *Iran radiator combustors catalog*, iranradiator.ir (In Persian)
- [3] British Petroleum, Statistical review of world energy 2007, BP, London, (2009). (In Persian)
- [4] Statistical center of Iran, www.amar.org.ir (In Persian)
- [5] ISIRI 5649: Voluminous and semi-voluminous breads manufacturing process machinery specifications, 1st Ed., *Institute of Standards and Industrial Research of Iran*, (2002). (In Persian)
- [6] Z. Utlua, A. Hepbaslib, A review on analyzing and evaluating the energy utilization efficiency of countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1) (2007) 1-29.
- [7] M. Filizadeh, A. Taheri, F. Forouzandeh, G. Karimi, Heat loss analysis in bakery ovens, *7th Students Conference of Chemistry Engineering*, (2008). (In Persian)
- [8] D. Malekmohammadi, D. Jalalivahid, Natural gas consumption analysis for producing different breads due to energy saving, *2nd Combustion Conference of Iran*, Mashhad, (2008). (In Persian)
- [9] I. Dincer, Y.A. Cengel, Entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering, *Entropy*, 3(3) (2001) 116-149.
- [10] M. Rosen, I. Dincer, Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development, *Exergy*, 1(1) (2001) 3-13.
- [11] S. Nasser Azadani, H. Ahmadi Danesh, Exergy and Energy Analysis of the Steam Power Plant in Isfahan Refinery in Iran, *Journal of Engineering Management*, 2(2) (2012) 28-39. (In Persian)
- [12] J. Abolfazliesfahani, S.M. Javadi, Entropy generation analysis for combustion phenomena in Methane-Air ovens, *2nd Combustion Conference of Iran*, Mashhad, (2008). (In Persian)
- [13] N. Shingaki, T. Akiyama, F. Tsukihashi, Exergy Analysis

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Abdolmehdi Hashemi, S. Sadripour, M. Estajloo, Energy and Exergy Analysis of Traditional Flatbread Bakeries,

Amirkabir J. Mech. Eng., 50(6) (2018) 1389-1402.

DOI: 10.22060/mej.2017.12012.5240

