



## تحلیل مکانیزم‌های انتقال حرارت در پخت نان‌های سنتی مسطح به‌منظور بهبود کیفیت نان و کاهش مصرف سوخت

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>\*</sup>، محمد استاجلو، سروش صدری‌پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۱۸  
پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

### کلمات کلیدی:

مطالعه تجربی-تحلیلی  
نان مسطح  
انتقال حرارت  
بهینه‌سازی  
کاهش مصرف سوخت

**خلاصه:** با برآورد سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های مختلف می‌توان راهکارهایی برای بهبود کیفیت نان و کاهش مصرف انرژی ارائه نمود. در این مطالعه، با انجام آزمایش و اندازه‌گیری، روابط تحلیلی و محاسبات ریاضی، سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های مختلف سنتی مسطح دست‌پز (سنگک، بربری و تافتون) تعیین می‌شود و سپس با توجه به نتایج، برای تنورهای مربوطه برآورد بهینه‌سازی انجام می‌شود. این بهینه‌سازی شامل اصلاح هندسه تنور، کنترل سهم هوای اضافی، بهبود خواص ترموفیزیکی کف تنور و خواص تشعشعی دیواره‌ها و سقف تنور می‌شود. هدف از بهینه‌سازی در مطالعه حاضر ابتدا بهبود کیفیت نان (با کنترل پخت یکنواخت تمام قسمت‌های نان) و سپس کاهش مصرف انرژی (با کاهش زمان مناسب پخت نان) است. نتایج نشان داد که در نان‌های سنگک و بربری سهم مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی (طبیعی و اجباری) در مقایسه با مکانیزم‌های هدایت و تشعشع حرارتی قابل صرف‌نظر است. نتایج بهینه‌سازی ضریب‌های نفوذ حرارتی و صدور دیواره‌های تنور نشان داد که می‌توان مصرف سوخت نان‌های سنگک، بربری و تافتون را به ترتیب در حدود ۲۶ درصد، ۲۸ درصد و ۸ درصد کاهش داد. همچنین در شرایط بهینه برای تمامی نان‌های، کاهش درصد هوای اضافی از مقادیر موجود تا ۱۰ درصد منجر به کاهش بیش از ۹۰ درصد از تلفات هوای اضافی شد.

### ۱- مقدمه

نان‌های سنتی و صنعتی، به یکی از صنایع برجسته کشور تبدیل شده است [۱]. منظور از اصطلاح نان سنتی، تولید و عرضه نان در نانوائی‌ها و منظور از اصطلاح نان صنعتی، تولید نان در کارگاه‌های صنعتی تولید نان و عرضه نان در فروشگاه‌ها است. تحقیقات به‌عمل آمده نشان می‌دهند که واحدها و کارگاه‌های صنعتی پخت نان تنها حدود ۳ درصد نان‌های کشور را شامل می‌شوند و سهم واحدها و کارگاه‌های صنعتی در برابر نانوائی‌های سنتی (دست‌پز و ماشینی) بسیار ناچیز است. دلیل این امر تمایل زیاد مردم به مصرف نان‌های سنتی و رایج بودن پخت این نوع نان در کشور است. منظور از تنورهای تنورهای بنایی‌شده قدیمی پخت نان‌های سنتی است و منظور از تنورهای ماشینی، انواع تنورهای فلزی گردان و ریلی پخت نان‌های سنتی می‌باشد. با وجود افزایش تعداد واحدهای ماشینی پخت نان در سال‌های اخیر، همچنان با حدود بیش از ۲۲۰۰۰ واحد، نانوائی‌های دست‌پز نزدیک به ۳۵ درصد

نان‌های سنتی و صنعتی، به یکی از صنایع برجسته کشور تبدیل شده است [۱]. منظور از اصطلاح نان سنتی، تولید و عرضه نان در نانوائی‌ها و منظور از اصطلاح نان صنعتی، تولید نان در کارگاه‌های صنعتی تولید نان و عرضه نان در فروشگاه‌ها است. تحقیقات به‌عمل آمده نشان می‌دهند که واحدها و کارگاه‌های صنعتی پخت نان تنها حدود ۳ درصد نان‌های کشور را شامل می‌شوند و سهم واحدها و کارگاه‌های صنعتی در برابر نانوائی‌های سنتی (دست‌پز و ماشینی) بسیار ناچیز است. دلیل این امر تمایل زیاد مردم به مصرف نان‌های سنتی و رایج بودن پخت این نوع نان در کشور است. منظور از تنورهای تنورهای بنایی‌شده قدیمی پخت نان‌های سنتی است و منظور از تنورهای ماشینی، انواع تنورهای فلزی گردان و ریلی پخت نان‌های سنتی می‌باشد. با وجود افزایش تعداد واحدهای ماشینی پخت نان در سال‌های اخیر، همچنان با حدود بیش از ۲۲۰۰۰ واحد، نانوائی‌های دست‌پز نزدیک به ۳۵ درصد

### جدول ۱: مشخصات نان‌های سنتی دست‌پز [۳]

Table 1.

نانوائی	$Q_u$ (MJ/kg)	$m_d$ (kg)	$m_B$ (kg)
سنگک	۱/۱۳۱	۰/۶۰	۰/۴۵
بربری	۱/۳۴۱	۰/۶۳	۰/۴۴
تافتون	۱/۰۶۱	۰/۱۷	۰/۱۳

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hashemi@kashanu.ac.ir



تجربی، تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده کردند. پهلوانزاده و شعبانی سرخنی [۱۵] در یک مطالعه آزمایشگاهی، پخت نان از طریق امواج مایکروویو را با پخت نان به روش سنتی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که زمان و انرژی حرارتی لازم برای پخت مایکروویو نان به مراتب کمتر از روش سنتی است و به دلیل پخت یکنواخت تمام نقاط نان، ضایعات نان نیز در روش حرارت‌دهی مایکروویو کمتر است. قنبری و شاهدی [۱۶] به مطالعه تجربی در مورد تأثیر دما و زمان پخت بر کیفیت و سرعت بیات‌شدن نان تافتون پرداختند. همچنین در مرجع [۱۴] برای پخت نان باگت فرانسوی، سهم مکانیزم هدایت ۱۹ درصد و سهم مکانیزم جابجایی ۱۴ درصد محاسبه شد.

هاشمی و همکاران [۱۷] به تحلیل انرژی و انرژی و بررسی راهکارهای کاهش مصرف سوخت در واحدهای دست‌پز پخت نان‌های سنتی سطح پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی، تحقیقات میدانی و محاسبات تحلیلی، ابتدا برآورد دقیقی از بازده و تلفات انرژی و مصرف سوخت انواع مختلف تنورهای دست‌پز پخت نان‌های سنتی سطح (سنگ، بربری و تافتون) انجام دادند و سپس با توجه به نتایج تحلیل انرژی و انرژی و شناخت عوامل اصلی تلفات، راهکارهای کاربردی برای کاهش مصرف سوخت این نان‌های ا ارائه نمودند. نتایج کار ایشان نشان داد که با کنترل مناسب سهم هوای اضافی، عایق کاری بهینه تنور و بازیابی تلفات حرارتی از دودکش، می‌توان بازده انرژی و انرژی تنورهای نان‌های سنگ، بربری و تافتون را افزایش و مصرف سالیانه گاز طبیعی را برای این واحدها، به ترتیب در حدود ۵۸، ۶۶ و ۸۲ درصد کاهش داد.

چنانچه مشاهده می‌شود، تاکنون هیچ مطالعه عددی و یا تجربی پیرامون تجزیه و تحلیل سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های سطح سنتی دست‌پز انجام نشده است. به عبارت بهتر، نویسندگان کار حاضر در نظر دارند در ادامه پژوهش هاشمی و همکاران [۱۷] و به منظور تکمیل آن به بهینه‌سازی هندسه تنور، خواص ترموفیزیکی و تشعشعی تنور بپردازند. نکته حائز اهمیت در مطالعه پیش‌رو آن است که مبنای بهینه‌سازی کیفیت نان بوده و تنها موارد بهینه‌سازی شده‌ای (به منظور کاهش مصرف سوخت) که کیفیت نان را حفظ می‌نمایند به عنوان مدل بهینه معرفی می‌شوند. بدین منظور در کار حاضر با انجام اندازه‌گیری و آزمایش برای واحدهای متعدد پخت نان‌های سنتی دست‌پز در شهرستان‌های قم و کاشان و انتخاب سه واحد نمونه از این نان‌های، مقادیر دمای قسمت‌های داخلی تنور، نرخ انرژی ورودی به تنور (انرژی حاصل از احتراق سوخت) و نرخ انرژی خارج شده از دهانه تنور تعیین می‌شوند. سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و داده‌های تجربی و همچنین

پخت نان یک فرآیند پیچیده است که در طول آن پدیده‌های فیزیکی زیادی مانند انتقال جرم و حرارت، تبخیر آب، انبساط حجمی، ژلاتینه‌شدن نشاسته، تشکیل ساختار متخلخل خمیر، تشکیل پوسته و برشته‌شدن اتفاق می‌افتد [۴]. مواد تشکیل‌دهنده خمیر نان عبارتند از: آرد، آب، نمک و مخمر [۵]. همچنین مواد دیگری نیز می‌توانند برای تغییر خواص خمیر اضافه شوند. برای پخت نان ابتدا مواد تشکیل‌دهنده خمیر، مخلوط و در یک محیط کنترل‌شده به خمیر متخلخل تبدیل می‌شوند. سپس چانه‌گیری انجام شده و چانه‌ها داخل تنور پهن می‌شوند [۶]. اولین پدیده در فرآیند پخت نان تشکیل حباب‌های دی‌اکسیدکربن است [۷ و ۸]. در ابتدا این حباب‌ها جدا از یکدیگر قرار دارند و انتقال گاز رخ نمی‌دهد. اما در ادامه، تخمیر مخمر دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند که باعث افزایش تخلخل می‌شود [۹ و ۱۰]. در دماهای بین  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $40^{\circ}\text{C}$  نرخ تخمیر به‌زای هر درجه افزایش دما، ۸ درصد زیاد می‌شود. اما از دمای  $40^{\circ}\text{C}$  به بعد، از شدت این پدیده کاسته و در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  انجام این پدیده متوقف می‌شود. خواص رئولوژیکی که اثر قابل توجهی بر تغییر شکل و ژلاتینه‌شدن دارند، در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  که خمیر در حال تغییر شکل به نان است رخ می‌دهند. سپس تغییر شکل‌های محدود اتفاق می‌افتد که ساختار پوسته نان را می‌سازد. آخرین پدیده‌ای که در فرآیند پخت انجام می‌شود، قهوه‌ای شدن سطح نان (برشته‌شدن) است [۱۱]. در طول فرآیند پخت، محتوای آب اولیه موجود در خمیر و نان تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  بدون تغییر باقی می‌ماند و تنها دمای آن بالا می‌رود [۱۲]. در دماهای بالاتر از  $100^{\circ}\text{C}$  مغز نان خشک می‌شود، دمای آن افزایش می‌یابد و در نهایت پوسته نان تشکیل می‌شود [۱۳].

در پخت نان‌های مختلف، مکانیزم‌های انتقال حرارت خاصی به‌عنوان مکانیزم غالب در فرآیند پخت سهم هستند. تأثیر مکانیزم‌های مختلف بر پخت نان متفاوت است. شناخت دقیق سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های مختلف، به ارائه راهکارهایی برای بهبود کیفیت نان و کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود. راهکارهایی از قبیل تغییر خواص ترموفیزیکی و تشعشعی دیواره‌های داخلی، تغییر شکل هندسی تنور، تعیین محل مناسب قرارگیری نان داخل تنور، تعیین سرعت مناسب حرکت گازهای داغ داخل تنور و تعیین ترکیب گازهای داغ داخل تنور (کنترل هوای اضافی) قابل ارائه است. 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. موندال و داتا [۱۴] پخت نان خمیری را در دو مرحله تجربی و عددی بررسی کردند. با رسم نمودار توزیع دما و رطوبت نان مدل شده و مقایسه آن با نتایج

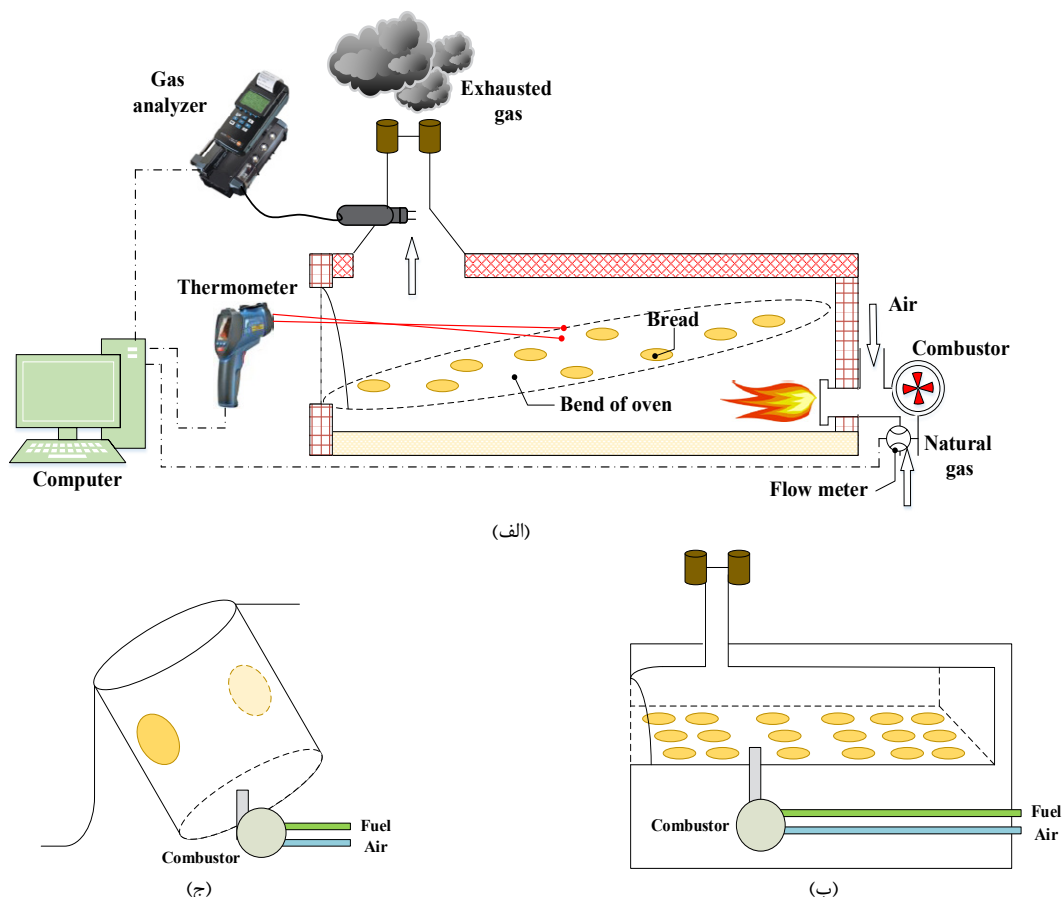


Fig. 1.

شکل ۱: (الف) نمای شماتیک تنور نانوبی سنگگ و دستگاه‌های اندازه‌گیری، نمای شماتیک تنورهای نانوبی (ب) بربری و (ج) لواش

این دستگاه می‌تواند تصاویر و مشخصات دمایی را ذخیره و به سیستم‌های کامپیوتری منتقل نماید [۱۸]. همچنین برای محاسبه بازده احتراق (گرمای باقی‌مانده داخل تنور) و تحلیل گازهای داغ داخل تنور از دستگاه تحلیل گاز (دود) تستو ۳۵۰ ایکس.ال ساخت کشور آلمان استفاده شده است. دستگاه تحلیل گاز تستو می‌تواند غلظت اکسیدهای نیتروژن و مونواکسیدکربن را به ترتیب تا میزان ۳۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰ ppm اندازه‌گیری نماید. همچنین ترموکوپل موجود در دستگاه تا دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  قابلیت تحمل دارد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای اکسیدهای نیتروژن در غلظت‌های کمتر از ppm ۱۰۰ برابر ۵ ppm و برای مونواکسیدکربن در غلظت‌های کمتر از ppm ۱۰۰ برابر ۱۰ ppm می‌باشد. در شکل ۱ نمای ظاهری این دو دستگاه نمایش داده شده است. دستگاه تحلیل دود نیز قابلیت ذخیره و چاپ اطلاعات و انتقال آن‌ها به سیستم‌های کامپیوتری را داراست [۱۹].

انجام محاسبات تحلیلی، سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان به دست می‌آید. در ادامه با استفاده از این نتایج، هندسه مناسب تنور، خواص ترموفیزیکی و تشعشی بهینه‌ای که باید در جداره‌های تنور استفاده شوند و سهم مناسب هوای اضافی در واکنش احتراق تعیین می‌شوند. همچنین لازم به ذکر است که از این پس در این مطالعه منظور از واژه نانوبی، واحد دست‌پز پخت نان سنتی مسطح است.

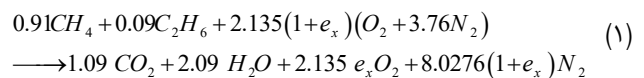
## ۲- الگوسازی تجربی

در شکل ۱ طرح‌واره انواع مختلف نانوبی‌ها و همچنین دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در کار حاضر نمایش داده شده‌اند. چنانچه مشاهده می‌شود، وسایل اندازه‌گیری شامل دماسنج غیرتماسی، دستگاه تحلیل دود و دی‌سنج است. در اندازه‌گیری قسمت‌های مختلف تنور از دماسنج ویدیویی مادون قرمز، مدل اس.تی-۹۸۶۱ استفاده شده است. این دماسنج مجهز به نمایش‌گر دیجیتال است و از طریق امواج مادون قرمز، درجه حرارت جسم را در محدوده دمایی بین  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $1600^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری می‌نماید. همچنین

### ۳- الگوسازی ریاضی

در تمامی تنورها، نان‌های در حال پخت از طریق مکانیزم‌های حرارتی جابه‌جایی، هدایت و تشعشع انرژی دریافت می‌کنند. در کار حاضر برای محاسبه سهم مکانیزم‌های انتقال حرارت در پخت نان سنگک و بربری، فرض شده که بخشی از گرمای حاصل از احتراق سوخت از طریق مکانیزم‌های تشعشع و جابه‌جایی به جداره‌های داخلی و نان‌های در حال پخت می‌رسد و بخشی نیز توسط گازهای داغ خروجی از دهانه تنور خارج می‌شود. از طرفی جداره‌های داغ داخلی با مکانیزم تشعشع و جابه‌جایی، به یکدیگر و نان‌های در حال پخت و از طریق مکانیزم تشعشع به محیط بیرون (از طریق دهانه) گرما صادر می‌کنند. نان‌های در حال پخت، علاوه بر گرمای صادر شده از شعله و دیواره‌های داخلی، از طریق مکانیزم هدایت از کف تنور نیز گرما دریافت می‌کنند. تلفات حرارتی تنها ناشی از تشعشع از سطوح داخلی به بیرون تنور نیست؛ بلکه از طریق مکانیزم هدایت و جابه‌جایی در طول ضخامت جداره‌ها نیز تلفات حرارتی صورت می‌گیرد.

با توجه به ترکیب گاز طبیعی در منطقه مورد مطالعه، در کار حاضر با انتخاب ترکیبی متشکل از ۹۱ درصد متان و ۹ درصد اتان به عنوان یک تقریب نزدیک به ترکیب واقعی گاز طبیعی، معادله واکنش احتراق سوخت و هوا داخل تنور با مقدار مشخص درصد هوای اضافی  $e_x$ ، نسبت هم‌آزری  $\phi$  و رطوبت نسبی صفر به صورت واکنش آورده شده در رابطه (۱) است [۲۰].



### مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی

با توجه به سرعت گازهای داغ داخل تنور و مسیر حرکت این گازها و همچنین گرادیان دما بین سطح نان و گازهای داغ داخل تنور، انتقال حرارت به‌صورت جابه‌جایی طبیعی و اجباری اتفاق می‌افتد. بنابراین تعیین سرعت گازهای داغ داخل تنور و مسیر حرکت این گازها در محاسبه سهم انتقال حرارت جابه‌جایی بسیار مهم است. سرعت گازهای داغ داخل تنور از رابطه (۲) که برای تقریب سرعت گازهای داغ در کوره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه می‌شود [۲۱].

$$u_{fl}^m = \frac{\dot{m}_F \cdot (1 + A/F)_{mass}}{\rho_{fl} \cdot A_{fl}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\dot{m}_F$  دبی جرمی گاز طبیعی،  $\rho_{fl}$  چگالی محصولات احتراق در دمای متوسط تنور،  $A_{fl}$  سطح مشخصه محل عبور گازهای داغ داخل تنور و  $(A/F)_{mass}$  نسبت جرمی هوا به سوخت است [۲۲ و ۲۳].

نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری موازی با صفحه تخت به طول  $L$  بر واحد سطح نان از رابطه (۳) به‌دست می‌آید [۲۲].

$$\dot{q}_{conv,f} = 0.037 Pr^{0.33} \left( \frac{\rho_{fl} \cdot u_{fl}^m \cdot L}{\mu_{fl}} \right)^{0.8} \frac{k_{fl}}{L} (T_{ov}^m - T_B) \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $k_{fl}$ ،  $\mu_{fl}$  و  $P_r$  به‌ترتیب ضریب هدایت حرارتی، لزجت دینامیکی و عدد پراوتل محصولات احتراق در دمای فیلم تنور ( $T_{film}$ ) هستند. منظور از دمای فیلم، میانگین دمای سطح نان‌های در حال پخت ( $100^\circ C$ ) و دمای متوسط تنور ( $T_{oven}^m$ ) است.

برخلاف معادلات جابه‌جایی اجباری که برای انواع نان‌ها یکسان است، معادلات جابه‌جایی طبیعی برای صفحات تخت افقی (نان بربری)، تخت قائم (تافتون) و تخت شیب‌دار (سنگک) متفاوت است؛ با این حال شرایط انواع تنورها به‌صورتی است که همواره جریان گازهای داغ داخل تنور، روی سطح سرد (نان) جریان دارند [۲۴].

برای نان تافتون در حال پخت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد روی صفحه قائم اتفاق می‌افتد. عدد ناسلت متوسط برای ترکیب جریان آرام و آشفته روی صفحه قائم از روابط (۴) تا (۸) محاسبه می‌شود. محدوده مجاز اعداد رایلی برای استفاده از این روابط برای جریان آرام و آشفته روی صفحه تخت قائم به‌ترتیب  $10^9 < Ra < 10^4$  و  $10^9 < Ra < 10^9$  است [۲۴].

$$Nu_n = \left[ \left( \frac{2.0}{\ln(1 + \frac{2.0}{Nu^T})} \right)_i + \left( \frac{C_i^v \cdot Ra^{1/3}}{1 + (1.4 \cdot 10^9) \cdot \frac{Pr}{Ra}} \right)_i \right]^{1/6} \quad (4)$$

$$Nu^T = \bar{C}_i \cdot Ra^{1/4} \quad (5)$$

$$\bar{C}_i = 0.671 \left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}$$

$$C_i^v = \frac{0.13 Pr^{0.22}}{(1 + 0.61 Pr^{0.81})^{0.42}} \quad (6)$$

$$Nu^T = 0.527Ra^{1/5} \left[ 1 + \left( \frac{1.9}{Pr} \right)^{0.9} \right]^{-2/9} \quad (۸)$$

$$Nu_l = Nu_n = \frac{2.5}{\ln \left( 1 + \frac{2.5}{Nu^T} \right)} \quad (۹)$$

نرخ انتقال حرارت به نان از طریق مکانیزم جابه‌جایی طبیعی بر واحد سطح نان با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{conv,n} = \frac{Nu_n \cdot k_{fl}}{L_B} \cdot (T_{ov}^m - T_B) \quad (۱۰)$$

نرخ انتقال حرارت کل بر واحد سطح نان از طریق مکانیزم جابه‌جایی، برابر با مجموع نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و اجباری است و از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{conv,B} = \dot{q}_{conv,f} + \dot{q}_{conv,n} \quad (۱۱)$$

### ۳-۱- مکانیزم انتقال حرارت هدایت

برای انجام محاسبات مربوط به هدایت حرارتی از کف تنور، ابتدا باید ضریب هدایت حرارتی کف تنور تعیین شود. جنس کف تنور نانویی‌های بربری و تافتون، به ترتیب از آجر نسوز و سفال است. کف تنور نانویی سنگگ دستی از محیطی متخلخل شامل سنگ و گاز داغ تشکیل شده است.

برای حل مساله هدایت حرارتی در مورد نان‌های سنتی در حال پخت، کف تنور یک دیواره نیمه بی‌نهایت فرض می‌شود. البته در عمل ضخامت کف محدود است و بی‌نهایت نیست ولی با توجه به اینکه جرم کف بسیار بیشتر از جرم قرص نان می‌باشد این فرض برای انتقال حرارت بین نان و کف منطقی است.

با توجه به دمای متوسط کف تنور، فرض می‌شود با قرار گرفتن نان در تنور، ابتدا یک نمو دمایی از دمای خمیر تا دمای کف تنور ایجاد شود و سپس انتقال حرارت به نان در دمای ثابت  $100^\circ C$  صورت گیرد. شار حرارتی ناشی از هدایت حرارتی منتقل شده به نان در حال پخت از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۲۶]. در این رابطه،  $t$  متوسط زمان پخت نان و  $ks$ ،  $ps$  و  $cp,s$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه کف تنور در دمای متوسط کف تنور ( $T_s^m$ ) هستند.

$$Ra = \frac{\beta_{fl} \cdot g \cdot \Delta T \cdot L_B^3}{\alpha_{fl} \cdot \nu_{fl}} \quad (۷)$$

در طرف سمت راست رابطه (۴)، جمله‌های اول و دوم به ترتیب عدد ناسلت جریان آرام و آشسته با در نظر گرفتن ضخامت لایه مرزی است. در این روابط،  $Nu^T$  عدد ناسلت متوسط با فرض جریان آرام و تقریب لایه مرزی نازک،  $\bar{C}_l$  تابع تقریب عمومی از عدد پراتل و تابع عدد پراتل و مربوط به جریان روی صفحه تخت قائم است. همچنین  $\alpha_{fl}$ ،  $\nu_{fl}$  و  $\beta_{fl}$  به ترتیب ضریب نفوذ حرارتی، لزجت سینماتیکی و ضریب انبساط حجمی محصولات احتراق در دمای فیلم تنور هستند [۲۴]. طول مشخصه نان ( $L_B$ ) با توجه به شرایط قرارگیری صفحه تخت، متفاوت است. برای صفحات تخت قائم (تنور نان تافتون) و شیب‌دار (تنور نان سنگگ)، طول مشخصه برابر با طول نان ( $L$ ) و برای صفحات تخت افقی (تنور نان بربری) طول مشخصه برابر با نسبت مساحت نان به محیط آن است [۲۵].

برای نان‌های بربری در حال پخت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد جریان روی صفحه سرد افقی اتفاق می‌افتد. فرض می‌شود تمامی صفحه در معرض حرارت قرار می‌گیرد و گرم می‌شود. از آنجایی که اغلب نیروی شناوری به طرف سطح صفحه جریان دارد، به‌ازای اعداد رایلی بالا رژیم جریان غالب، آرام است. مقدار عدد ناسلت متوسط با فرض تقریب لایه مرزی نازک و مقدار عدد ناسلت متوسط برای جریان آرام در محدوده  $10^3 < Ra < 10^4$  با در نظر گرفتن ضخامت لایه مرزی، به ترتیب از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید [۲۵]. برای نان‌های سنگگ در حال پخت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد روی سطح شیب‌دار اتفاق می‌افتد. برای محاسبات مربوط به جابه‌جایی آزاد روی صفحه شیب‌دار با زاویه  $\theta$  نسبت به سطح افق، ابتدا با استفاده از روابط (۴) و (۸)، عدد ناسلت محاسبه می‌شود؛ با این تفاوت که در محاسبه عدد رایلی باید به جای  $g$  از عبارت  $g \cdot \sin(\xi)$  استفاده شود ( $\xi = 180 - \theta$ ). سپس با استفاده از روابط (۸) و (۹) برای جریان روی صفحه تخت افقی، محاسباتی مشابه برای عدد ناسلت انجام می‌شود؛ با این تفاوت که به جای  $g$  از عبارت

$g \cdot \{0, -\cos(\xi)\}_{max}$  در محاسبه عدد رایلی مربوط به این قسمت استفاده می‌شود. سپس از بین دو عدد ناسلت متوسط محاسبه شده، بیشینه مقدار آن‌ها به عنوان عدد ناسلت متوسط برای جریان جابه‌جایی آزاد روی صفحه تخت شیب‌دار، انتخاب می‌شود [۲۴].

شار حرارتی تشعشعی انتقال یافته از گازهای داغ حاصل از احتراق به سطح نان، با رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن و برابر  $5/67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$  است.

$$\dot{q}_{r-BV} = \sigma \left( \frac{\epsilon_s + 1}{2} \right) (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_B^4) \quad (16)$$

علاوه بر تشعشع حجمی، تشعشع حرارتی سطح به سطح نیز از طریق دیواره‌ها و سقف تنور به سطح نان صورت می‌گیرد. اصولاً در تشعشع سطحی مربوط به نانوایی‌های سنگگ و بربری، عمده تشعشع از سقف (با دمای متوسط  $T_r^m$ ) ساطع می‌شود؛ به این دلیل که نان‌ها تقریباً دیدی به سطوح جانبی ندارند و می‌توان ضریب دید آن‌ها را در مقایسه با ضریب دید سقف، صفر در نظر گرفت و از تشعشع سطحی از دیواره‌های جانبی به نان در حال پخت، نسبت به تشعشع سطحی از سقف صرف‌نظر نمود. مقدار شار حرارتی تشعشعی سطحی منتقل شده از سقف تنور به یک قرص نان سنگگ یا بربری با رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود [۲۷].

$$\dot{q}_{r-B,S} = \epsilon_r \sigma (T_r^m)^4 - T_B^4 \quad (17)$$

برای نانوایی تافتون دست‌پز، علاوه بر تشعشع دریافتی از سطوح جانبی به سطح نان، تشعشع مستقیم دریافت شده از شعله به سطح نان نیز حائز اهمیت است. بنابراین تشعشع سطحی منتقل شده به نان‌های در حال پخت در نانوایی تافتون، مجموع تشعشع سطحی دریافتی از دیواره‌ها و تشعشع مستقیم دریافتی از شعله به سطح نان است. از سوی دیگر، تقریباً نیمی از سطوح جانبی تنور نانوایی تافتون به‌وسیله نان‌های در حال پخت پوشیده می‌شود، میزان شار حرارتی سطحی تشعشعی از دیواره‌های تنور نانوایی تافتون با دمای متوسط  $T_r^m$  به سطح نان، نصف می‌شود. همچنین در شرایط شعله نانوایی تافتون، با توجه به تخمین راندمان تابشی شعله حدود ۱۰ درصد انرژی حاصل از احتراق سوخت ورودی، به‌وسیله شعله به سطوح قابل دید ساطع می‌شود [۲۳]. از طرفی با توجه به ضریب دید دهانه تنور نسبت به شعله، نیمی از تشعشع ساطع شده از شعله از طریق دهانه تنور خارج شده و باقیمانده آن به دیواره‌ها و نان‌های داخل تنور، منتقل می‌شود. با توجه به گنجایش تنور نانوایی تافتون مورد آزمایش که برابر ۵ عدد نان است، تشعشع سطحی از شعله به یک نان، برابر با نیم درصد از انرژی حاصل از احتراق سوخت ورودی به تنور است. بنابراین تشعشع سطحی منتقل شده به یک قرص نان تافتون با رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۲۷ و ۲۱].

$$\dot{q}_{cond,B} = k_s^{1/2} (T_s^m - T_B) \left( \frac{\pi t}{\rho_s c_{p,s}} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

### ۳-۲- مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی

انتقال حرارت تشعشعی داخل تنور نانوایی شامل تشعشع حجمی و تشعشع سطحی است. تشعشع حرارتی حجمی از طریق گازهای داغ حاصل از احتراق صورت می‌گیرد. برای محاسبه انتقال حرارت تشعشع حجمی منتقل شده به نان‌های در حال پخت، ابتدا باید ضریب‌های صدور و جذب گازهای داغ داخل تنور مشخص شوند. این ضریب‌ها با توجه به دمای متوسط دیواره‌ها  $T_r^m$  و دمای سطح نان  $T_B$  به دست می‌آیند. فرض می‌شود تمام گازهای داخل تنور مخلوط گاز ایده‌آل هستند و سطح نان و دیواره‌ها سطح خاکستری است. همچنین فرض می‌شود سهم انتقال حرارت تشعشعی گازهای اکسیژن و نیتروژن ناچیز است و از تشعشع پخشی صرف‌نظر می‌شود [۲۷]. به این ترتیب فشار جزئی گازهای داغ داخل تنور به صورت رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$P_c = x_{CO_2} \cdot P, \quad P_2 = x_{H_2O} \cdot P \quad (13)$$

ضریب صدور مؤثر گازهای داغ حاصل از احتراق از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$\epsilon_g = C_c \cdot \epsilon_{c,lam} + C_w \cdot \epsilon_{w,lam} - \Delta \epsilon \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $\epsilon_c$  و  $\epsilon_w$  ضریب صدور گازهای دی‌اکسید کربن و بخار آب در فشار ۱ atm و  $\Delta \epsilon$  عبارت تصحیح ضریب صدور هستند که به صورت تابعی برحسب فشار جزئی اجزاء، متوسط طول پرتو  $L_R$  و دمای متوسط گازهای داغ، معرفی و به شکل نمودارهایی در مرجع [۲۷] ارائه شده‌اند. ضریب‌های  $C_w$  و  $C_c$  مربوط به تصحیح فشار هستند و با توجه به این که فشار داخل تنور تقریباً ۱ atm است، این ضریب‌ها برابر ۱ هستند. همچنین ضریب جذب گازهای داغ داخل تنور برحسب ضریب صدور این گازها در انتقال حرارت تشعشعی گازهای داغ با سطح نان از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\alpha_g = C_c \left( \frac{T_g}{T_B} \right)^{0.65} \epsilon_{c,lam} + C_w \left( \frac{T_g}{T_B} \right)^{0.65} \epsilon_{w,lam} - \Delta \alpha \quad (15)$$



Fig. 2.

شکل ۲: اندازه‌گیری دما به کمک دماسنج مادون قرمز در قسمت‌های مختلف تنور نانوبایی‌های (الف) سنگ، (ب) بربری و (ج) تافتون

محاسبه نمود [۱۹ و ۲۹].

$$\eta_{comb} = 100 - \left[ (FT - AT) \cdot \left( \frac{0.66}{0.21 - O_2\%} + 0.009 \right) \right] \quad (21)$$

به این ترتیب هدررفت انرژی سوخت در اثر وجود هوای اضافی با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$\Delta \dot{V}'_{excess\ air} = \eta_{stoic} - \eta_{comb} \left( \frac{\dot{Q}}{LHV} \right)_F \quad (22)$$

در کار حاضر با افزایش نرخ انتقال حرارت به نان، زمان مناسب (مجاز) پخت نان کاهش می‌یابد که صرفه‌جویی در مصرف سوخت با توجه به کاهش زمان مناسب پخت نان و کاهش هوای اضافی با رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$PFS = \left| \frac{\Delta \dot{V}'_{new} - \Delta \dot{V}'_{old}}{\Delta \dot{V}'_{old}} \right| \times 100 \quad (23)$$

#### ۴- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج آزمایش‌های تجربی، تحقیقات میدانی و محاسبات تحلیلی برای تعیین سهم مکانیزم‌های انتقال حرارت در پخت انواع نان‌های دست‌پز سنگ، بربری و تافتون ارائه می‌شود. سپس برای تنورهای مورد آزمایش برآورد بهینه‌سازی به منظور کاهش مصرف سوخت انجام می‌شود.

##### ۴-۱- سهم مکانیزم‌های انتقال حرارت در پخت نان

در کار حاضر دمای قسمت‌های مختلف داخل تنور انواع نانوبایی‌های سنگ، بربری و تافتون با استفاده از دستگاه دماسنج غیرتماسی ای.تی-

$$\dot{q}_{r-B,S} = \frac{1}{2A_B} \left[ \epsilon_r \sigma A_B \left( (T_r^m)^4 - T_B^4 \right) + 0.20 \dot{Q}_F \right] \quad (18)$$

شار حرارتی تشعشی کل به سطح نان برابر با مجموع شار حرارتی تشعشی سطحی از تمامی دیواره‌ها به سطح نان و شار حرارتی تشعشی حجمی از گازهای حاصل از احتراق به سطح نان است و از رابطه (۱۹) به دست می‌آید [۲۷].

$$\dot{q}_{r,B} = \dot{q}_{r-B,V} + \dot{q}_{r-B,S} \quad (19)$$

در نتیجه شار حرارتی کل در فرآیند پخت نان که مجموع شار حرارتی جابه‌جایی، هدایت و تشعشع است با رابطه (۲۰) قابل محاسبه است.

$$\dot{q}_{total,B} = \dot{q}_{conv,B} + \dot{q}_{cond,B} + \dot{q}_{rad,B} \quad (20)$$

##### ۳-۳- کاهش مصرف سوخت

از عوامل تأثیرگذار در تلفات حرارتی، هوای اضافی ورودی به واکنش احتراق (مشعل) است. ورود بیش از اندازه هوای اضافی می‌تواند باعث کاهش بازده احتراق شود؛ چراکه بخش زیادی از انرژی توسط هوای اضافی از تنور خارج می‌شود [۲۳]. از طرفی برای اطمینان از سوختن کامل گاز طبیعی و جلوگیری از تولید برخی آلاینده‌ها، وجود مقداری هوای اضافی در واکنش احتراق لازم است. با توجه به عملکرد مشعل‌های نوین [۲۸]، واکنش احتراقی با ۵ الی ۱۱ درصد هوای اضافی به‌عنوان یک واکنش مناسب و قابل انجام از نظر کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌ها شناخته می‌شود. با استفاده از رابطه (۲۱) مشهور به رابطه سیگرت می‌توان بازده احتراق را برحسب هوای اضافی

جدول ۲: تحلیل گازهای خروجی از دودکش و بازده احتراق تنورهای مختلف نانویی به کمک دستگاه تحلیل گر تستو

Table 2.

$\eta_{comb}$ (%)	$e_x$ (%)	$FT$ (°C)	$AT$ (°C)	$T_{ad}$ (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	NO (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	نانوایی
۶۸/۷۶	۱۶۲	۳۴۱/۳	۱۹/۹۰	۹۶۶/۷۵	۲۶	۰/۶	۲۶	۲۷۰	۴/۲۴	۱۳/۵۲	سنگ
۶۷/۴۰	۲۷۳	۲۵۶/۲	۱۶/۹۰	۷۱۵/۰۵	۵	۱/۳	۳	۳۸۵	۲/۹۴	۱۵/۸۱	بربری
۴۳/۰۰	۴۹۲	۲۸۷/۶	۲۰/۶۰	۸۱۵/۲۵	۹	۰/۹	۱۰	۱۲	۱/۸۳	۱۷/۷۷	تافتون

جدول ۳: نتایج آزمایش‌ها در مورد ویژگی‌های نان‌های مختلف

Table 3.

$T_g$ (K)	$T_r^m$ (°C)	$T_s^m$ (°C)	$T_{ov}^m$ (°C)	$A_B$ (m <sup>2</sup> )	$L_B$ (m)	$n_B$	$\Delta t$ (s)	$m_B$ (kg)	$m_d$ (kg)	$\dot{V}_F$ (m <sup>3</sup> .hr <sup>-1</sup> )	نانوایی
۶۱۴/۴۵	۴۰۰	۳۶۵	۳۹۰	۰/۱۷	۰/۶۳	۲۹	۱۲۰۰	۰/۴۵	۰/۶۰	۶/۰۱	سنگ
۵۲۹/۳۵	۴۱۰	۲۸۵	۳۷۰	۰/۱۵	۰/۰۹	۲۴	۷۲۰	۰/۴۴	۰/۶۳	۸/۲۸	بربری
۵۶۰/۷۵	۳۵۵	۳۵۵	۶۵۰	۰/۴۰	۰/۵۰	۲۰	۳۶۰	۰/۱۳	۰/۱۷	۲۰/۱۶	تافتون

می‌توانند نسبت به مقادیر ذکر شده متفاوت باشند و یا زمان پخت نان‌ها داخل تنور، دمای کف تنور و داخل آن می‌تواند متفاوت از مقادیر ذکر شده باشد که منجر به کیفیت متفاوت پخت از نظر همگن بودن پخت و برشته بودن یا خشک بودن نان شود. طبق نتایج، کل شار حرارتی دریافتی از طریق مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت توسط یک قرص نان سنگگ، بربری و تافتون، به ترتیب در حدود ۲۰۹۴۷، ۱۹۵۷۴ و ۲۶۹۸۶ وات بر مترمربع است.

همچنین درصد سهم مکانیزم‌های انتقال حرارت در پخت نان‌های سنگگ، بربری و تافتون محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در نان‌های سنگگ و بربری برخلاف نان تافتون، سهم مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی در مقایسه با دیگر مکانیزم‌ها ناچیز است. دلیل این امر هندسه خاص تنور تافتون می‌باشد که باعث می‌شود گازهای داغ حاصل از احتراق با سرعت بیشتری از روی نان‌های در حال پخت عبور نمایند و مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی در این تنور تشدید شود. به بیان دیگر می‌توان گفت برای پخت نان‌های سنگگ و بربری، مکانیزم‌های غالب انتقال حرارت، هدایت و تشعشع حرارتی هستند؛ درحالی‌که در پخت نان تافتون مکانیزم جابجایی نسبت به دو نان دیگر سهم بیشتری دارد. بنابراین در نان‌های سنگگ و بربری می‌توان از سهم مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی در مقابل مکانیزم‌های هدایت و تشعشع صرف نظر نمود. بنابراین به نظر می‌رسد نباید انتظار داشت که در نانویی‌های سنگگ و بربری ارائه روش‌هایی مانند افزایش سرعت گازهای داغ داخل تنور یا تغییر ترکیب این گازها به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین

۹۸۶۱، چندین مرتبه و با دقت اندازه‌گیری شده است و سپس برای هر کدام از جداره‌های داخلی یک دمای متوسط و میانگین معرفی شده است. شکل ۲ برخی نتایج اندازه‌گیری‌های دما برای انواع نانویی‌های سنگگ، بربری و تافتون را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها در مورد تحلیل گازهای خروجی از دودکش و بازده احتراق تنورهای نانویی سنگگ، بربری و تافتون 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 نانویی سنگگ و بربری در حدود ۷۰ درصد و بازده احتراق تنور نانویی تافتون در حدود ۴۳ درصد است. این امر نشان می‌دهد که در هر سه نوع تنور و به‌خصوص تنور تافتون سهم تلفات انرژی از دودکش بالا است. به‌عنوان مثال در تنور نانویی تافتون حدود ۵۷ درصد انرژی حاصل از احتراق از دودکش خارج شده و مابقی انرژی صرف پخت نان و تلفات از جداره‌های تنور می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود دمای گازهای خروجی از دودکش تنور سنگگ نسبت به تنور تافتون بیشتر است؛ با این حال مشاهده می‌شود که بازده احتراق تنور سنگگ بیشتر می‌باشد؛ دلیل این امر بالاتر بودن سهم هوای اضافی در فرآیند احتراق تنور تافتون می‌باشد. همچنین جدول ۳ نتایج آزمایش‌ها در مورد ویژگی‌های نان‌های سنگگ، بربری و تافتون و نتایج میانگین‌گیری از دمای جداره‌های داخلی تنور را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در ارائه نتایج این است که محاسبات برای نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شده است و با توجه به تنوع کارکرد نانویی‌ها این مقادیر می‌توانند متفاوت باشند. مثلاً جرم چانه و نان



جدول ۴: درصد سهم مکانیزم‌های انتقال حرارت و همچنین درصد خطای موجود در روابط تجربی برای پخت یک قرص نان

Table 4.

نانوایی‌های مورد بررسی			سهم مکانیزم انتقال حرارت (%)
تافتون	بربری	سنگک	ادرسد خطای روابط تجربی (%)
[± ۰/۰۸] ۳/۶۵	[± ۰/۰۲] ۰/۴۶	[± ۰/۰۲] ۰/۳۲	مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری
[± ۰/۲۶] ۱۱/۶۷	[± ۰/۱۹] ۴/۷۱	[± ۰/۳۱] ۵/۲۴	مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی
[± ۰/۳۴] ۱۵/۳۲	[± ۰/۲۱] ۵/۱۷	[± ۰/۳۳] ۵/۶۵	مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی
[± ۲/۴۲] ۵۱/۳۶	[± ۱/۴۶] ۴۳/۲۹	[± ۱/۵۶] ۴۴/۵۲	مکانیزم انتقال حرارت هدایت
[± ۰/۱۵] ۱/۷۶	[± ۰/۱۳] ۳/۷۴	[± ۰/۵۷] ۸/۰۱	مکانیزم انتقال حرارت تشعشع حجمی
[± ۲/۱۳] ۳۱/۵۶	[± ۲/۰۲] ۴۷/۸۰	[± ۳/۳۷] ۴۱/۹۱	مکانیزم انتقال حرارت تشعشع سطحی
[± ۲/۲۸] ۳۳/۳۲	[± ۲/۱۵] ۵۱/۵۴	[± ۳/۹۴] ۴۹/۹۲	مکانیزم انتقال حرارت تشعشع

گام دوم کاهش مصرف سوخت در واحدهای نانوایی است. در مورد نان‌های مسطح بایستی برای بهبود کیفیت نان و کاهش سهم دورریز، سهم انرژی دریافتی نان‌های در حال پخت از بالا و پایین تقریباً یکسان باشد. همچنین باید پخت نان در یک بازه زمانی مجاز انجام گیرد و پخت نان در زمانی کمتر یا بیشتر از این بازه مجاز باعث کاهش کیفیت نان می‌شود.

در کار حاضر به‌صورت پارامتریک ضریب نفوذ حرارتی کف تنور، ضریب صدور تشعشعی دیواره‌ها و سقف تنور، سهم هوای اضافی در واکنش احتراق و ارتفاع سقف تنور تغییر داده می‌شوند تا به مدل بهینه‌ای دست یافته شود که در آن سهم انرژی دریافتی توسط نان از بالا و پایین تقریباً یکسان باشد. این نسبت تقریباً یکسان، در محدوده ۶۰ درصد: ۴۰ درصد تا ۵۰ درصد: ۵۰ درصد متغیر است. به عبارت بهتر، بهترین نسبت ۵۰ درصد: ۵۰ درصد است که باعث می‌شود سهم انرژی دریافتی به‌وسیله نان از بالا و پایین یکسان باشد؛ اما در صورتی که سهم انرژی دریافتی توسط نان از فضای بالا و پایین خود ۶۰ درصد: ۴۰ درصد هم باشد، کیفیت مناسب نان تضمین می‌شود. معیار انتخاب این محدوده، شرایط موجود در تنورهای فعلی است که با تحقیقات میدانی حاصل شده است.

در گام بعد برای مدل‌های بهینه از نظر کیفیت پخت، با تقویت نرخ انتقال حرارت به نان، زمان پخت در محدوده مجاز (با حفظ کیفیت نان) کاهش پیدا می‌نماید و بدین ترتیب میزان مصرف سوخت برای پخت هر قرص نان کاهش می‌یابد. معیار انتخاب محدوده مجاز زمانی برای پخت نان نیز شرایط موجود در تنورهای فعلی است که با تحقیقات میدانی حاصل شده است.

نمودارهای تغییرات درصد شار حرارتی دریافتی توسط نان سنگک در حال پخت برحسب تغییرات ضریب صدور دیواره‌ها، ضریب نفوذ حرارتی کف، سهم هوای اضافی و ارتفاع سقف تنور، برای مقایسه کیفیت نان‌های در حال پخت

گازهای داغ داخل تنور و سطح نان‌های در حال پخت، کارآمد و نتیجه‌بخش باشد. از سوی دیگر سهم بالای هدایت حرارتی در پخت نان‌های مختلف و به‌خصوص نان تافتون، نشان می‌دهد که می‌توان انتظار داشت که با انجام تغییراتی در جنس دیواره (تنور تافتون) و کف تنور (تنورهای سنگک و بربری) می‌توان سهم این مکانیزم را تقویت نمود و تا جایی که کیفیت نان تحت تأثیر قرار نگیرد در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود. با نگاهی دقیق‌تر در جدول ۴ می‌توان دریافت که سهم مکانیزم تشعشع در پخت انواع مختلف نان زیاد است؛ با این حال سهم مکانیزم تشعشع حجمی در مقابل تشعشع سطحی قابل چشم‌پوشی است. بنابراین این ذهنیت ایجاد می‌شود که احتمالاً ایجاد تغییرات در جنس گازهای داغ به‌منظور تغییر خواص تشعشعی این گازها و بهبود شرایط تنور مناسب به‌نظر نمی‌رسد؛ چراکه سهم مکانیزم تشعشع حجمی چندان زیاد نیست و ایجاد تغییرات در آن نمی‌تواند تفاوت چندان در شرایط تنور ایجاد نماید؛ اما به احتمال زیاد با تغییر خواص تشعشعی سطوح داغ داخل تنور می‌توان مکانیزم انتقال حرارت تشعشع سطحی را تقویت و کاهش مصرف سوخت نانوایی‌ها را زمینه‌سازی نمود. همچنین در جدول ۴ درصد خطای موجود در روابط تجربی نیز ارائه شده است.

درستی یا نادرستی تمامی این فرضیه‌ها که مبتنی بر نتایج استخراج‌شده از جدول ۴ هستند، در قسمت‌های آینده به‌تفکیک و به‌خوبی راستی‌آزمایی شده و با پیش‌بینی‌های انجام‌شده از قبل و مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. به این ترتیب می‌توان به راهکارهایی مهم و چاره‌ساز در زمینه کاهش مصرف سوخت نانوایی‌های کشور دست یافت.

#### ۴-۲- بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی در کار حاضر، در گام نخست بهبود کیفیت نان و در

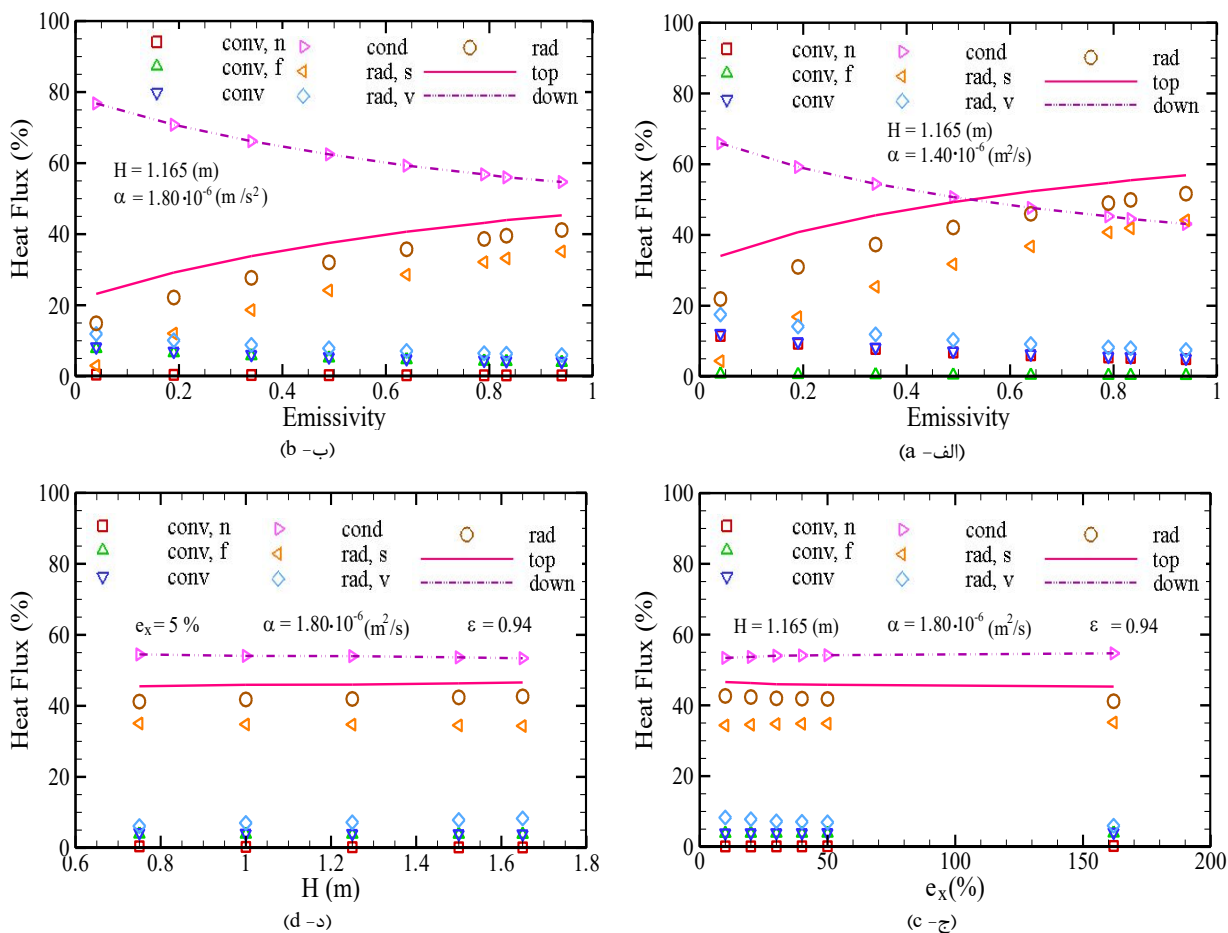


Fig. 3

شکل ۳: درصد شار حرارتی دریافتی توسط نان سنگگ برحسب (الف و ب) تغییرات ضریب صدور دیواره‌ها و ضریب نفوذ حرارتی کف تنور، (ج) سهم هوای اضافی و (د) ارتفاع سقف تنور برای مقایسه کیفیت نان در حال پخت

که با سعی و خطا در رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد نباید از محدوده فوق تجاوز کند. با توجه به نمودار ۳ (الف) در محدوده ضریب صدور سقف بین ۰/۱۹ تا ۰/۳۴ با این که درصد انرژی دریافتی نان از بالا و پایین در بازه مجاز قرار دارد؛ اما به دلیل این که زمان پخت نان بسیار بیشتر از مقادیر مجاز است، در نتیجه محدوده فوق برای ضریب صدور سقف مردود خواهد بود. با مقایسه شکل ۳ (الف) و نمودار ۳ (ب) و یا مشاهده جدول ۵ می‌توان دریافت که از لحاظ کیفیت نان، تنور نانویی سنگگ به ترتیب با مقادیر ضریب نفوذ حرارتی کف و ضریب صدور سقف  $1/40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و ۰/۴۹ در شرایط بهینه قرار دارد؛ اما مصرف گاز این تنور نسبت به تنور فعلی افزایش خواهد داشت. همچنین در تنورهای فعلی با افزایش ضریب صدور سقف از مقدار ۰/۸۳۳ به ۰/۹۴، به میزان ۷/۱۵ درصد و با افزایش همزمان ضریب نفوذ حرارتی کف و ضریب صدور سقف از مقادیر  $1/40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و ۰/۸۳۳ (وضعیت فعلی تنورهای پخت نان سنگگ) به مقادیر  $1/80 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و ۰/۹۴، ضمن کاهش زمان پخت

در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. محل تلاقی خطوط نشان‌گر انتقال حرارت از بالا و پایین در شکل ۳ و همچنین حاشیه اطراف آن بهترین کیفیت نان حاصل می‌نمایند. همچنین جدول ۵ نتایج محاسبات مربوط به کاهش زمان مجاز پخت و در نتیجه کاهش مصرف سوخت را در مورد مدل‌های بهینه از نظر کیفیت، برای نانویی سنگگ نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵ در گام اول با در نظر گرفتن شرایط موجود و ثابت ماندن هوای اضافی و ارتفاع سقف تنور، ضرایب بهینه کف و سقف با این شرایط که سهم انرژی دریافتی سطح رویی نان (مجموع مکانیزم‌های جابجایی و تشعشع حرارتی) و همچنین سطح زیرین نان (مکانیزم هدایت حرارتی)، اختلاف فاحشی با یکدیگر نداشته باشند، مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، محدودیت اصلی در انتخاب شرایط بهینه، زمان پخت نان است که برای نانویی سنگگ، بسته به آن که نان در ناحیه دور از مشعل (سمت چپ تنور) و یا نزدیک به مشعل (سمت راست تنور) پهن شود، بین ۳/۵ تا ۶ دقیقه متفاوت است. لذا در شرایط جدید زمان پخت نان

جدول ۵: کاهش مصرف سوخت برای مدل‌های بهینه از نظر کیفیت برای ناوایی سنگک

Table 5.

PFS (%)	$\dot{V}_F = \Delta \dot{V}_{excess\ air}$ (m <sup>3</sup> .hr <sup>-1</sup> )	t (s)	q <sub>down</sub> (%)	q <sub>top</sub> (%)	H (m)	e <sub>x</sub> (%)	ε <sub>r</sub>	α (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	ردیف
مورد آزمایش	۶/۰۱	۲۸۵	۴۴/۵۲	۵۵/۴۸	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۸۳۳	۱/۴۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱
-	۷/۷۰	۳۶۵	۵۰/۷۱	۴۹/۲۹	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۴۹	۱/۴۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۲
-	۶/۸۴	۳۲۵	۴۷/۶۶	۵۲/۳۴	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۶۴	۱/۴۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۳
-	۶/۱۲	۲۹۰	۴۵/۲۸	۵۴/۷۲	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۷۹	۱/۴۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۴
۷/۱۵	۵/۵۸	۲۶۵	۴۳/۱۲	۵۶/۸۸	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۹۴	۱/۴۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۵
۱۰/۸۲	۵/۳۶	۲۵۵	۵۹/۳۰	۴۰/۷۰	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۶۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۶
۱۹/۱۳	۴/۸۶	۲۳۰	۵۶/۸۴	۴۳/۱۶	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۷۹	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۷
۲۰/۳۰	۴/۷۹	۲۲۷	۵۶/۰۲	۴۳/۹۸	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۸۳۳	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۸
۲۶/۲۹	(۱/۰۹) ۴/۴۳	۲۱۰	۵۴/۶۹	۴۵/۳۱	۱/۶۵	۱۶۱/۹۸	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۹
۶۰/۸۰	(۰/۳۴)	۲۱۰	۵۴/۱۸	۴۵/۸۲	۱/۶۵	۵۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۰
۷۵/۲۳	(۰/۲۷)	۲۱۰	۵۴/۱۰	۴۵/۹۰	۱/۶۵	۴۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۱
۸۱/۶۵	(۰/۲۰)	۲۱۰	۵۴/۰۳	۴۵/۹۷	۱/۶۵	۳۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۲
۸۷/۶۱	(۰/۱۴)	۲۱۰	۵۳/۶۹	۴۶/۳۱	۱/۶۵	۲۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۳
۹۳/۵۸	(۰/۰۷)	۲۱۰	۵۳/۴۱	۴۶/۵۹	۱/۶۵	۱۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۴
-	-	۲۱۰	۵۳/۶۶	۴۶/۳۴	۱/۵	۱۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۵
-	-	۲۱۰	۵۴/۰۱	۴۵/۹۹	۱/۲۵	۱۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۶
-	-	۲۱۰	۵۴/۰۷	۴۵/۹۳	۱	۱۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۷
-	-	۲۱۰	۵۴/۴۹	۴۵/۵۱	۰/۷۵	۱۰	۰/۹۴	۱/۸۰ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۸

صورت تغییر مشعل دسترسی به مقدار فوق مقدور نباشد.

گام نهایی بهینه‌سازی تنورهای پخت نان سنگک مربوط به کاهش ارتفاع سقف تنورها در شرایط بهینه مراحل قبل است. نتایج محاسبات این بخش حاکی از آن است که با کاهش ارتفاع سقف، تشعشع حجمی گازهای داغ حاصل از احتراق کاهش می‌یابد که این امر خلاف آن چیزی است که در واقعیت رخ خواهد داد. لذا پس از مطالعات مختلف و بررسی‌های انجام گرفته در این بخش، نتیجه شد که تنها زمانی مطالعه کاهش ارتفاع سقف تنور مفید خواهد بود که تنور مذکور با ارتفاع جدید ساخته شده و در حین پخت نان، مجدداً داده‌برداری‌ها تکرار شود. مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده، زمان متوسط پخت یک نان بربری در حدود ۷ دقیقه است. بنابراین همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، توجه به محدودیت‌های موجود برای بهینه‌سازی از جمله معقول بودن زمان پخت نان و سهم انرژی دریافتی نان از بالا و پایین، امری ضروری است. مطابق جدول ۶ شرایط فعلی تنورهای پخت نان بربری به این صورت است که مقدار ضریب نفوذ حرارتی کف تنور برابر با  $4/29 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  و ضریب صدور

نان، می‌توان در حدود ۲۶ درصد در مصرف گاز ناوایی صرفه‌جویی ایجاد کرد. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب نفوذ حرارتی بزرگتر از مقدار  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  نیز مورد بررسی قرار گرفت که به دلیل ارضا نکردن محدودیت انرژی دریافتی نان از بالا و پایین، از ارائه نتایج آن صرف‌نظر و ضریب نفوذ حرارتی کف برابر با  $1/80 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  و همچنین ضریب صدور سقف برابر با  $0/94$  به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد. گام دوم، کاهش هوای اضافی برای شرایط بهینه مربوط به گام اول نتایج است. مطابق جدول ۵ می‌توان به این نتیجه رسید که به‌ازای کاهش هر ۱۰ درصد هوای اضافی، می‌توان در حدود ۶ درصد در تلفات انرژی ناشی از هوای اضافی صرفه‌جویی ایجاد نمود در حالی که سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت و در نتیجه درصد انرژی دریافتی نان از بالا و پایین تغییر چندانی نخواهد کرد. لذا در صورت تنظیم هوای اضافی مشعل و کاهش آن از مقدار ۱۶۲ درصد در شرایط فعلی، به میزان ۱۰ درصد در شرایط فرضی جدید، تقریباً ۹۴ درصد در تلفات مربوط به هوای اضافی صرفه‌جویی خواهد شد. البته با توجه به باز بودن دهانه تنور مکن است حتی در

جدول ۶: کاهش مصرف سوخت برای مدل‌های بهینه از نظر کیفیت برای نانویی بربری

Table 6.

<i>PFS</i> (%)	$\dot{V}_F = \Delta \dot{V}_{excess\ air}$ (m <sup>3</sup> .hr <sup>-1</sup> )	<i>t</i> (s)	<i>q<sub>down</sub></i> (%)	<i>q<sub>top</sub></i> (%)	<i>H</i> (m)	<i>e<sub>x</sub></i> (%)	<i>ε<sub>r</sub></i>	<i>α</i> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	ردیف
مورد آزمایش	۸/۲۸	۴۲۰	۴۳/۲۹	۵۶/۷۱	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۸۳۲	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۱
-	۱۳/۶۱	۶۹۰	۵۵/۳۶	۴۴/۶۴	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۳۴	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۲
-	۱۱/۵۲	۵۸۵	۵۰/۹۵	۴۹/۰۵	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۴۹	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۳
-	۹/۹۷	۵۰۵	۴۷/۶۴	۵۲/۳۶	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۶۴	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۴
-	۸/۸۶	۴۵۰	۴۴/۸۳	۵۵/۱۷	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۷۹	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۵
۳/۵۰	۷/۹۹	۴۰۵	۴۲/۵۴	۵۷/۴۶	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۹۴	۴/۲۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۶
۲۲/۶۱	۶/۴۱	۳۲۵	۵۷/۷۸	۴۲/۲۲	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۷۹	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۷
۲۴/۷۸	۶/۲۹	۳۱۵	۵۷/۱۰	۴۲/۹۰	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۸۳	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۸
۲۸/۷۰	(۱/۹۰) ۵/۹۰	۳۰۰	۵۵/۱۵	۴۴/۸۵	۱/۷۵	۲۷۲/۸۶	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۹
۸۱/۷۱	(۰/۳۵)	۳۰۰	۵۴/۷۱	۴۵/۲۹	۱/۷۵	۵۰	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۰
۸۵/۳۷	(۰/۲۸)	۳۰۰	۵۴/۷۰	۴۵/۳۰	۱/۷۵	۴۰	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۱
۸۹/۰۳	(۰/۲۱)	۳۰۰	۵۴/۶۸	۴۵/۳۲	۱/۷۵	۳۰	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۲
۹۲/۶۹	(۰/۱۴)	۳۰۰	۵۴/۶۰	۴۵/۴۰	۱/۷۵	۲۰	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۳
۹۶/۳۴	(۰/۰۷)	۳۰۰	۵۴/۵۵	۴۵/۴۵	۱/۷۵	۱۰	۰/۹۴	۲/۵۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۴

جدول ۶: کاهش مصرف سوخت برای مدل‌های بهینه از نظر کیفیت برای نانویی بربری

Table 6.

<i>PFS</i> (%)	$\dot{V}_F = \Delta \dot{V}_{excess\ air}$ (m <sup>3</sup> .hr <sup>-1</sup> )	<i>t</i> (s)	<i>q<sub>down</sub></i> (%)	<i>q<sub>top</sub></i> (%)	<i>H</i> (m)	<i>e<sub>x</sub></i> (%)	<i>ε<sub>r</sub></i>	<i>α</i> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	ردیف
مورد آزمایش	۲۰/۱۶	۱۸۰	۵۱/۳۶	۴۸/۶۴	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۹۱	۱/۰۱ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱
۰/۵۴	۲۰/۰۵	۱۷۹	۵۱/۲۱	۴۸/۷۹	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۹۴	۱/۰۱ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۲
۰/۰۰	۲۰/۱۶	۱۸۰	۵۷/۵۹	۴۲/۴۱	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۴۹	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۳
۲/۸۶	۱۹/۵۸	۱۷۵	۵۶/۷۳	۴۳/۲۷	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۶۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۴
۵/۵۴	۱۹/۰۴	۱۷۰	۵۵/۹۳	۴۴/۰۷	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۷۹	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۵
۸/۳۹	۱۸/۴۷	۱۶۵	۵۵/۴۲	۴۴/۵۸	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۹۱	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۶
۸/۳۹	(۹/۲۲) ۱۸/۴۷	۱۶۵	۵۵/۲۰	۴۴/۸۰	۰/۸	۴۹۲/۳۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۷
۸۹/۴۵	(۰/۹۴)	۱۶۵	۵۵/۷۹	۴۴/۲۱	۰/۸	۵۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۸
۹۱/۸۸	(۰/۷۵)	۱۶۵	۵۵/۷۳	۴۴/۲۷	۰/۸	۴۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۹
۹۳/۹۱	(۰/۵۶)	۱۶۵	۵۵/۷۰	۴۴/۳۰	۰/۸	۳۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۰
۹۵/۹۴	(۰/۳۷)	۱۶۵	۵۵/۵۷	۴۴/۴۳	۰/۸	۲۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۱
۹۷/۹۷	(۰/۱۹)	۱۶۵	۵۵/۵۵	۴۴/۴۵	۰/۸	۱۰	۰/۹۴	۲/۲۳ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۲

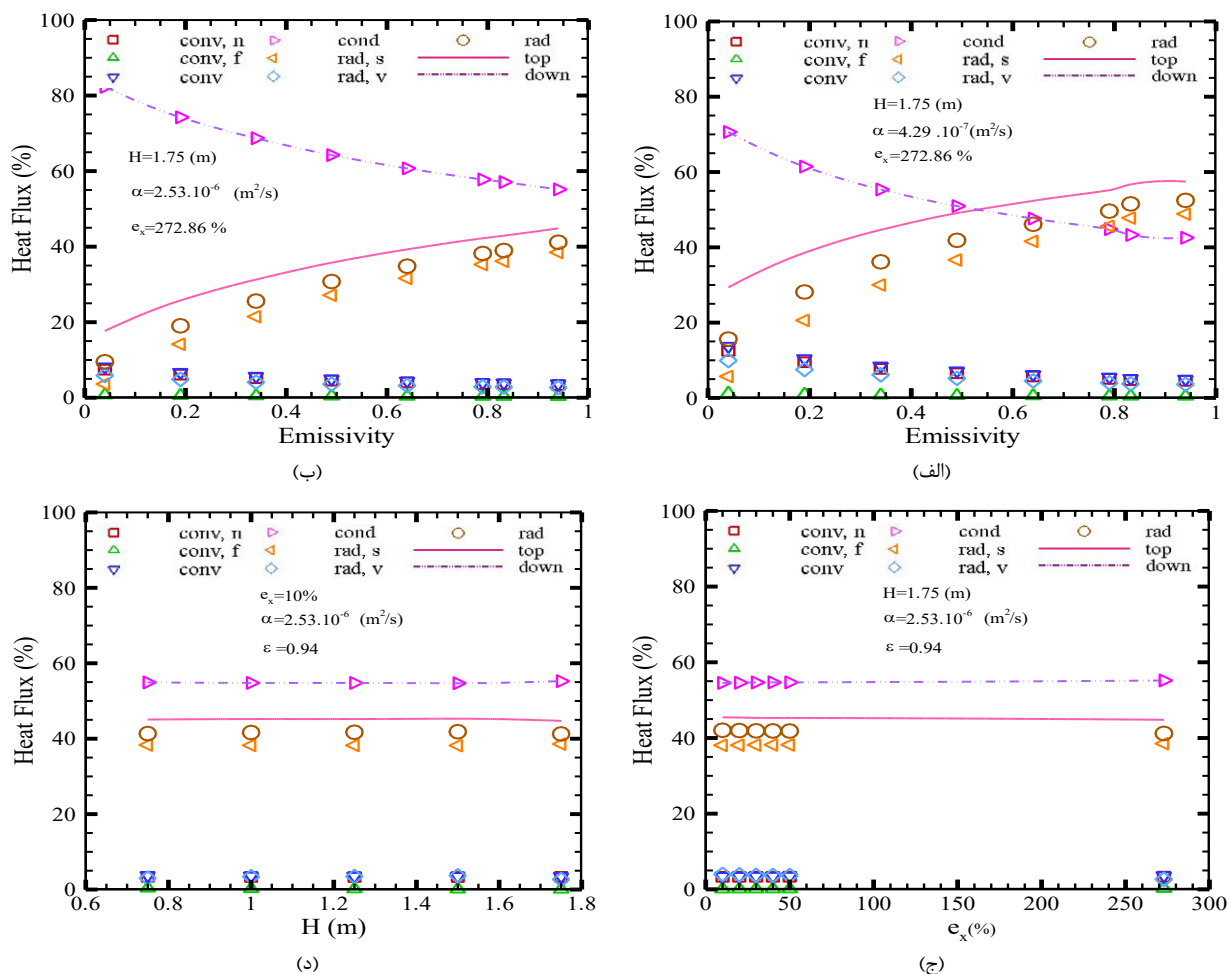


Fig. 4

شکل ۴: درصد شار حرارتی دریافتی توسط نان بربری بر حسب (الف و ب) تغییرات ضریب صدور دیواره‌ها و ضریب نفوذ حرارتی کف، (ج) سهم هوای اضافی و (د) ارتفاع سقف تنور برای مقایسه کیفیت نان در حال پخت

۲/۵۳ می‌توان در حدود ۲۵ درصد در مصرف سوخت نانویی صرفه‌جویی ایجاد کرد. همچنین در این شرایط نیز با تغییر ضریب صدور سقف از مقدار ۰/۸۳۲ به ۰/۹۴ می‌توان در حدود ۴ درصد دیگر در مصرف گاز نانویی صرفه‌جویی ایجاد کرد. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب نفوذ حرارتی بزرگ‌تر از  $2/53 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$  نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه شد که در تمام مقادیر ضریب صدور سقف، سهم انرژی دریافتی نان از بالا و پایین در محدوده مجاز نبوده و اختلاف فاحشی با هم دارند. پس از مشخص شدن مقادیر بهینه برای ضرایب صدور سقف و نفوذ حرارتی کف، گام بعدی در راستای بهینه‌سازی مصرف سوخت نانویی بررسی تأثیر کاهش هوای اضافی بر سوخت مصرفی است. بدین منظور با انتخاب ضریب نفوذ حرارتی کف برابر با  $2/53 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$  و ضریب صدور سقف برابر با ۰/۹۴ به‌عنوان شرایط بهینه، مطابق جدول ۶ به‌ازای کاهش هر ۱۰ درصد هوای اضافی می‌توان در حدود ۴ درصد از تلفات

سقف برابر با ۰/۸۳۲ می‌باشد. با مشاهده شکل ۴ مشخص است که در ضریب نفوذ حرارتی برابر با  $4/29 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$  به‌ازای مقادیر ضریب صدور سقف کوچک‌تر از ۰/۳۴ سهم انرژی دریافتی از بالا و پایین در محدوده مجاز نیست. همچنین با توجه به این که در مقادیر ضریب صدور در محدوده ۰/۳۴ تا ۰/۷۹ انرژی دریافتی از بالا و پایین در محدوده است؛ اما مطابق جدول ۶ زمان پخت نان بیش از حد مجاز است و مصرف سوخت افزایش خواهد داشت. علاوه بر این در شرایط موجود با رساندن ضریب صدور سقف به مقدار ۰/۹۴ تنها می‌توان در حدود ۳/۵ درصد در مصرف سوخت صرفه‌جویی ایجاد کرد که این مقدار چندان مقرون به صرفه نیست. لذا برای تنور نانویی بربری تغییر در ضریب نفوذ حرارتی کف می‌تواند نتایج بهتری در پی داشته باشد. مطابق جدول ۶ با ثابت ماندن ضریب صدور سقف در شرایط موجود (۰/۸۳۲) و تنها تغییر ضریب نفوذ حرارتی کف تنور از مقدار  $4/29 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$  به مقدار  $2/53 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$

اضافی از مقدار ۳۰/۴۹۲ درصد به مقدار ۱۰ درصد می‌توان در حدود ۹۸ درصد از تلفات انرژی ناشی از هوای اضافی کم نمود.

### ۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ابتدا با انجام آزمایش و اندازه‌گیری به‌وسیله دماسنج ویدیویی مادون قرمز، مدل اس.تی-۹۸۶۱ و دستگاه تحلیل گاز (دود) تستو ۳۵۰ ام/ایکس.ال، مشخصات تنوره‌های مختلف دست‌پز نان‌های سنتی مسطح (سنگک، بربری و تافتون) از جمله دمای جداره‌های داخلی تنور و همچنین ترکیب گازهای داغ داخل تنور مشخص شد. سپس با استفاده از روابط تحلیلی و محاسبات ریاضی، سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های مختلف سنتی دست‌پز تعیین شد.

نتایج نشان داد سهم انتقال حرارت جابه‌جایی در پخت نان‌های سنگک و بربری بسیار کم است (حدود ۵ درصد) و می‌توان از سهم این مکانیزم در مقابل

ناشی از هوای اضافی کم نمود. لذا می‌توان با تنظیم هوای اضافی مشعل و کاهش آن از مقدار ۸۶/۲۷۲ درصد در شرایط فعلی، به‌میزان ۱۰ درصد در شرایط جدید، تقریباً ۹۶ درصد در تلفات مربوط به هوای اضافی صرفه‌جویی خواهد شد. مطابق نتایج مربوط به نانوائی سنگک، در نانوائی بربری نیز بررسی و بهینه‌سازی ارتفاع سقف تنور تنها با ساخت و داده‌برداری‌ها از آن، امکان‌پذیر خواهد بود. به‌دلیل هندسه خاص تنور نانوائی تافتون، امکان تغییر در هندسه تنور میسر نیست و فقط می‌توان به بررسی ضرایب نفوذ و صدور دیواره‌های جانبی و مهم‌تر از آن کاهش هوای اضافی پرداخت (شکل ۵). مطابق جدول ۷ شرایط فعلی تنوره‌های پخت نان تافتون به این صورت است که مقادیر ضریب نفوذ حرارتی و ضریب صدور دیواره تنور به‌ترتیب  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $0.1/0.91$  می‌باشد. با تغییر ضریب نفوذ حرارتی از مقدار موجود به مقدار  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  می‌توان حدود ۸ درصد در مصرف سوخت نانوائی تافتون صرفه‌جویی ایجاد کرد. همچنین همان‌گونه که از جدول ۷ مشخص است با کاهش هوای

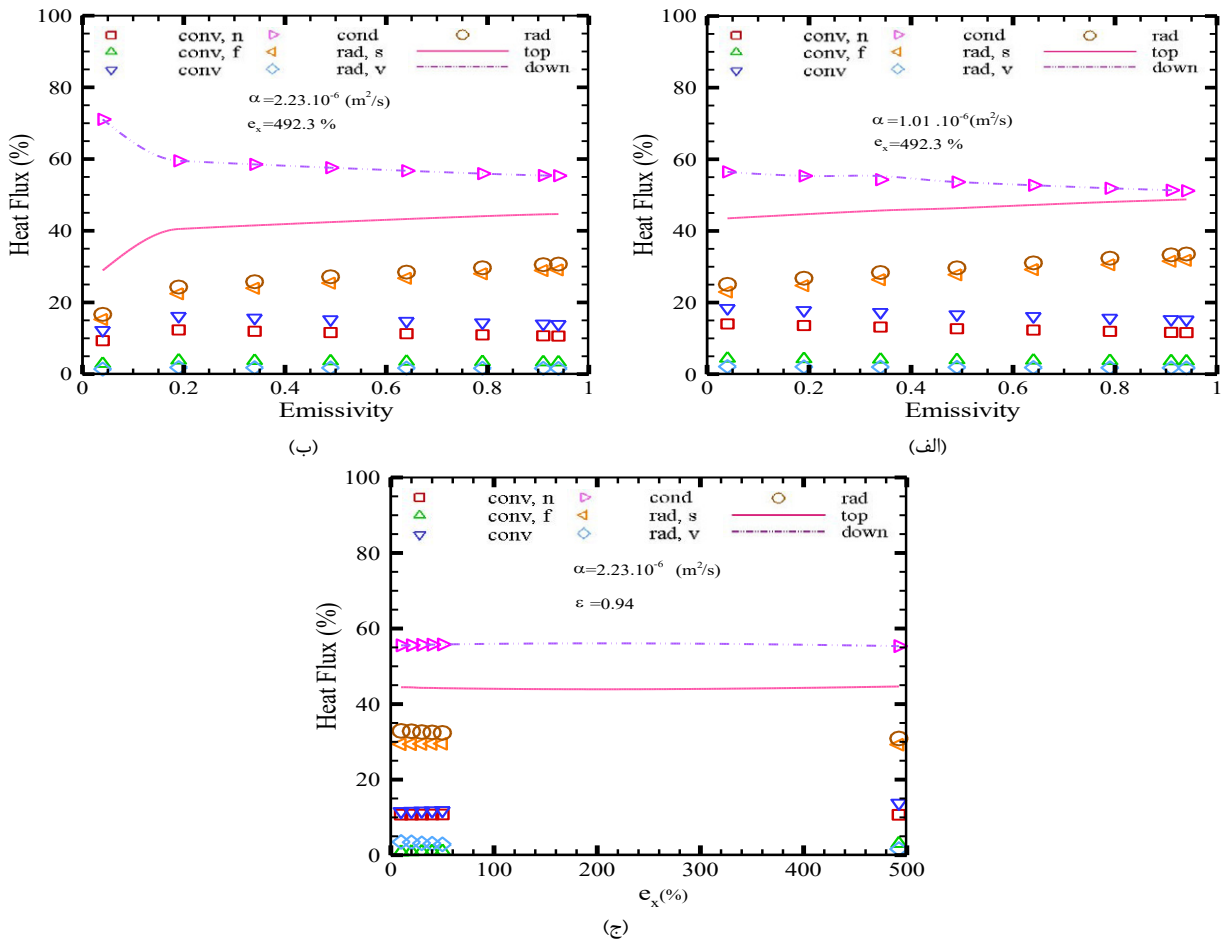


Fig. 4

شکل ۴: درصد شار حرارتی دریافتی توسط نان بربری بر حسب (الف و ب) تغییرات ضریب صدور دیواره‌ها و ضریب نفوذ حرارتی کف، (ج) سهم هوای اضافی و (د) ارتفاع سقف تنور برای مقایسه کیفیت نان در حال پخت

## ۶- فهرست علائم

$A$	سطح مشخصه ( $m^2$ )
$A/F$	نسبت هوا به سوخت
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$H$	ارتفاع کف تا سقف تنور (m)
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$L$	طول مشخصه (m)
$LHV$	ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی ( $36000 kJ.m^{-3}$ )
$m$	جرم (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kg.s^{-1}$ )
$Nu$	عدد ناسلت
$P$	فشار (atm)
$PFS$	درصد کاهش مصرف سوخت
$Pr$	عدد پرانتل
$Ra$	عدد رایلی
$T$	دما ( $^{\circ}C$ ) (K)
$t$	زمان متوسط پخت یک نان (s)
$u$	سرعت ( $m.s^{-1}$ )

### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب نفوذ حرارتی ( $m^2.s^{-1}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )
$\varepsilon$	ضریب صدور
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\sigma$	ثابت استفان-بولتزمن ( $5/67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-1}$ )

### بالانویس ها

$m$  متوسط

### زیرنویس ها

$ad$	آدیاباتیک
$B$	نان
$c$	کربن دی اکسید
$d$	خمیر نان
$F$	سوخت (گاز طبیعی)
$f$	جابه‌جایی اجباری
$fl$	جریان گازهای داغ داخل تنور
$l$	جریان آرام
$n$	جابه‌جایی طبیعی
$ov$	تنور
$r$	مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی
$S$	تشعشع سطحی از دیواره تنور
$s$	کف تنور
$t$	جریان آشفته
$V$	تشعشع حجمی ناشی از گازهای داغ
$w$	آب

مکانیزم‌های هدایت و تشعشع صرف نظر نمود. سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال

حرارت در پخت نان‌های دست‌پز سنتی به این صورت است:

• سنگگ: هدایت ۴۴/۵۲ درصد، تشعشع ۴۹/۹۲ درصد و جابه‌جایی ۵/۵۶ درصد

• بربری: هدایت ۴۳/۲۹ درصد، تشعشع ۵۱/۵۴ درصد و جابه‌جایی ۵/۱۷ درصد

• تافتون: هدایت ۵۱/۳۶ درصد، تشعشع ۳۳/۳۲ درصد و جابه‌جایی ۱۵/۳۲ درصد

شناخت دقیق سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در پخت نان‌های مختلف، به ارائه راهکارهایی برای بهبود کیفیت نان و کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود. لذا بهینه‌سازی خواص ترموفیزیکی و تشعشعی دیواره‌های تنورهای مختلف دست‌پز نقش به‌سزایی در کاهش مصرف سوخت نانوائی‌ها و کیفیت نان‌ها ایفا می‌کند. بدین منظور ابتدا ضریب‌های نفوذ حرارتی کف و تشعشعی سقف، بهینه و در گام بعدی تأثیر درصد کاهش هوای اضافی در شرایط بهینه گام نخست، بررسی شد. نتایج نشان داد که برای نانوائی‌های سنگگ، بربری و تافتون به‌ترتیب ضریب نفوذ حرارتی بهینه برای کف تنور  $1.8 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$ ،  $2.53 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$  و  $2.23 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$  و همچنین ضریب صدور بهینه ۰/۹۴، ۰/۹۴ و ۰/۹۱ است که این مقادیر بهینه به‌ترتیب در حدود ۲۶، ۲۸ و ۸ درصد در مصرف گاز نانوائی صرفه‌جویی ایجاد کرد. همچنین با کاهش درصد هوای اضافی از مقادیر موجود به مقدار ۱۰ درصد برای مقادیر بهینه ضریب‌های نفوذ حرارتی کف و صدور دیواره تنور برای نانوائی‌های سنگگ، بربری و تافتون، می‌توان به‌ترتیب در حدود ۹۴، ۹۶ و ۹۸ درصد از تلفات مربوط به هوای اضافی کاست. پس از مطالعات مختلف و بررسی‌های انجام‌گرفته در مورد کاهش ارتفاع کف تا سقف تنورهای سنگگ و بربری، نتیجه شد که تنها زمانی مطالعه کاهش ارتفاع سقف تنور مفید خواهد بود که تنور مذکور با ارتفاع جدید ساخته شده و در حین پخت نان، مجدداً داده‌برداری‌ها تکرار شود.

carbon dioxide evolution in chemically leavened wheat flour dough”, *Journal of agric. food chemistry*, 56, pp. 9855–9861, 2008.

- [10] G.G. Bellido, M.G. Scanlon, J.H. Page, “Measurement of dough specific volume in chemically leavened dough systems”, *Journal of cereal science*, 49, pp. 212–218, 2009.
- [11] J. Rouillé, H. Chiron, P. Colonna, G. Della Valle, D. Lourdin, “Dough/crumb transition during French bread baking”, *Journal of cereal science*, 52, pp. 161–169, 2010.
- [12] M.J. Wagner, T. Lucas, D. Le Ray, G. Trystram, “Water transport in bread during baking”, *Journal of food engineering*, 78, pp. 1167–1173, 2007.
- [13] A. Mondal, A.K. Datta, “Bread baking – a review”, *Journal of food engineering*, 86, pp. 465–474, 2008.
- [14] A. Mondal, A.K. Datta, “Two-dimensional CFD modeling and simulation of crustless bread baking process”, *Journal of food engineering*, 99, pp. 166-174, 2010.
- [15] H. Pahlavanzadeh, H. Shabani, A. Sarakhni, “An investigation of baking bread through short waves and compare it with traditional baking”, *Iranian Journal of Energy*, 66 (50), 2001. (in Persian فارسی)
- [16] M. Ghanbari, M. Shahedi, “The effect of temperature and baking time on the quality and speed of bread staling”, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 12 (43), 2008. (in Persian فارسی)
- [17] S.A.M. Hashemi, S. Sadripour, M. Estajloo, “Energy and Exergy Analyzes and Evaluation of Fuel Consumption Reduction Techniques in Traditional Flatbreads Bakeries”, *Amirkabir Mechanical Engineering Journal*, Article in press. (in Persian فارسی)

## تشکر و قدردانی

از مرکز امور پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز استان قم به خاطر پشتیبانی و حمایت همه جانبه در انجام این پژوهش سپاس گزاری و قدردانی می شود.

## منابع

- [1] Nutrition and food research institute of Iran, Master plan for household food consumption patterns and nutritional status of Iran, 2014. (in Persian فارسی)
- [2] S. Daneshgar, “Comparative statistics of bakery units in the years 1383, 1386 and 1389”, Grain Research Center, 2011. (in Persian فارسی)
- [3] S.A.M. Hashemi, M. Estajloo, S. Sadripour, “An experimental and mathematical study to calculate the bakery and oven efficiencies of traditional bakeries in Iran”, ISME2016, Yazd, Iran, 2011. (in Persian فارسی)
- [4] V. Nicolas, P. Salagnac, P. Glouanne, J.P. Plotea, V. Jury, L. Boillereaux, “Modelling heat and mass transfer in deformable porous media: Application to bread baking”, *Journal of food engineering*, 130, pp. 23–35, 2014.
- [5] V. Jury, J.Y. Monteau, J. Comiti, A. Le-Bail, “Determination and prediction of thermal conductivity of frozen part baked bread during thawing and baking”, *Food research international*, 40(7), pp. 874–882, 2007.
- [6] L. Stampfli, B. Nersten, “Emulsifiers in bread baking”, *Food chemistry*, 52(4), pp. 353-360, 1995.
- [7] E. Chiotellis, G.M. Campbell, “Proving of bread dough I: modelling the evolution of the bubble size distribution”, *Food bioprod process*, 81, pp. 194–206, 2003a.
- [8] E. Chiotellis, G.M. Campbell, “Proving of bread dough II: Measurement of gas production and retention”, *Food bioprod process*, 81, pp. 207–216, 2003b.
- [9] G.G. Bellido, M.G. Scanlon, H.D. Sapiststein, J.H. Page, “Use of a pressuremeter to measure the kinetics of



- [25] T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, Introduction to heat transfer, John Wiley and sons, 7th ed., USA, 2002.
- [26] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, D.P. Introduction to heat transfer, John Wiley and sons, 4th ed, 2007.
- [27] Y.A. Cengel, Heat transfer, a practical approach, McGraw Hill science engineering math, New York, 2002.
- [28] burnurs of iranradiator company, [www.iranradiator.ir](http://www.iranradiator.ir). (in Persianفارسی)
- [29] N. Kraiem, M. Lajil, L. Limous, R. Said, and M. Jeguirim, “Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc”, Energy, 107, pp. 409–418, 2016.
- [18] Thermometer ST-9861, Instruction manual handbook, TST, 2012.
- [19] Testo M/XL350, Instruction manual handbook, TESTO, 2011.
- [20] N. Sato, “Chimical energy and exergy”, Elsevier science & technology books, Chapter 8, 9, 10 and 11, 2004.
- [21] P. Mullinger, B. Jenkins, “Industrial and process furnaces”, Elsevier Ltd., 1st ed., 2008.
- [22] Institute of Standards and Industrial Research of Iran, [www.isiri.org](http://www.isiri.org). (in Persianفارسی)
- [23] S. R. Turns and S. J. Mantel, An Introduction to Combustion, 3rd ed., New York, McGraw Hill, 2000.
- [24] W.M. Rohsenov, J.P. Hartnett, Y.I. Cho, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, 3rd ed., New York, 1998.