



توسعه ماشین پخت نان دوار با حرارت غیرمستقیم برای افزایش کیفیت محصول با استفاده از تکنیک عددی

فرید بجایی^۱، سید صادق سیدلو^{۲*}، حبیبه نعلبندی^۳ و حمید رضا قاسم‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۱۰

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: Email: ss_seiedlo@yahoo.com

چکیده

زمینه مطالعاتی: نان به دلیل تامین بخشی از کالری، پروتئین، ویتامین‌ها و مواد مورد نیاز بدن یکی از مهم‌ترین منابع غذایی مردم به ویژه در کشورهای در حال توسعه و توسعه نیافته است. در ایران ۵۶ درصد از خانواده‌های روستایی، کالری خود را از نان، آن هم به صورت نان مسطح و نازک دریافت می‌کنند و میانگین مصرف سرانه نان دو الی سه برابر میانگین مصرف جهانی است. بنابراین سلامت و کیفیت آن بسیار مهم می‌باشد. به دلیل کیفیت پایین پخت، سالانه مقادیر زیادی نان به صورت ضایعات از دسترس خارج می‌شود. عوامل موثر بر دور ریز شامل کیفیت آرد، تکنولوژی تولید نان و نحوه نگهداری محصول پس از تولید است. هدف: هدف از این مطالعه اصلاح تکنولوژی پخت صنعتی نان مسطح به منظور کاهش آلودگی محصول و نیز افزایش کیفیت نان می‌باشد. روش کار: یک دستگاه پخت نان دوار با حرارت غیر-مستقیم ساخته شد. به طوری که شبیه‌سازی مبدل حرارتی ماشین متناسب با فضای پخت صورت گرفت و از نتایج آن برای بررسی نحوه و یکنواختی بردارهای سرعت جریان هوا در داخل مبدل و متناسب با آن در توزیع گرما روی خمیر موجود در بستر پخت استفاده شد. پس از حصول مناسب‌ترین طرح، نسبت به ساخت آن اقدام شد و در داخل ماشین پخت نصب گردید. آزمایش پخت نان با ماشین توسعه داده شده و نیز پخت با ماشین‌های متداول موجود، اجرا و یکنواختی محصول به همراه آزمون‌های حسی صورت گرفت. نتایج: نتایج نشان داد که کیفیت نان‌های تولید شده با مبدل توسعه یافته شده نسبت به روش صنعتی موجود از امتیاز حسی کل ۵/۰۹ در مقابل ۴/۵۴ برخوردار بود. ضمن اینکه به دلیل عدم تماس شعله و گازهای حاصل از احتراق با بستر پخت و نان، آلودگی با بنزوپیرن نمی‌تواند در پخت به روش حرارت غیرمستقیم وجود داشته باشد. نتیجه‌گیری نهایی: نان پخته شده در سیستم حرارت غیرمستقیم دارای امتیاز کیفی بالا و عمر نگهداری بالاتری بود.

واژگان کلیدی: آلودگی، انتقال ممنوم، شبیه‌سازی رایانه‌ای، ماشین پخت، مبدل حرارتی

مقدمه

در اکثر کشورها به ویژه کشورهای در حال توسعه و توسعه نیافته، نان دارای اهمیت تغذیه‌ای بالایی است. این فرآورده دارای ۴۰ الی ۴۵ درصد کربوهیدرات قابل استفاده بوده و منبع مهم پروتئین نیز محسوب شده و در دستگاه گوارش نقش مهمی ایفا می‌کند (امین‌پور و شریعت‌زاده ۱۳۹۲). میانگین سرانه مصرف جهانی نان ۶۰ الی ۷۰ کیلوگرم است (بی‌نام ۱۳۹۶). میزان مصرف سالانه نان در ایران سه برابر مصرف جهانی نان می‌باشد (پاشایی و حق‌نظری ۱۳۹۸). در ایران با توجه به نوع نان مصرفی و روش نگهداری و مصرف آن، سالانه مقادیر زیادی به صورت ضایعات از دسترس خارج می‌شود (روانفر و همکاران ۱۳۹۲). عوامل موثر بر دور ریز نان، ناشی از ضایعات در مرحله تولید آن و سپس ضایعات در مرحله مصرف است. در حال حاضر تغییر در ساختار تولید نان از روش‌های سنتی به روش‌های صنعتی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین عوامل تولید نان بهداشتی و استاندارد و ارتقای کیفیت آن به شمار می‌رود (بی‌نام ۱۳۹۰). بیشترین حجم نان مصرفی در ایران و بعضی از کشورهای حوزه قفقاز و عربی، مختص نان‌های مسطح بوده و در ایران سنگک، تافتون، لواش و بربری بیشتر مصرف می‌شود.

در روش تولید نان مسطح به صورت نیمه‌صنعتی و با حرارت مستقیم، درجه حرارت پخت، روش و مقدار انتقال گرما، نوع سوخت، مقدار رطوبت در محفظه پخت، نوع بستر پخت، طراحی ماشین و مدت فرآیند پخت، بر کیفیت نان مؤثر می‌باشند (رجب‌زاده ۱۳۷۵). بنابراین بهبود مداوم در تکنولوژی پخت از نظر کیفیت محصول نهایی، کاهش ضایعات و توجیه اقتصادی ضروری است. از بین فاکتورهای مؤثر روی کیفیت نان، عوامل تکنولوژیکی شامل منبع و نحوه حرارت‌دهی به خمیر و نوع بستر پخت دارای اهمیت زیادی بوده و کیفیت و بیای نان و میزان مصرف انرژی به ازای هر تن محصول تولیدی را

تحت تأثیر قرار می‌دهد. همه این مباحث به نحوه انتقال گرما و انتقال جرم وابسته هستند.

در حال حاضر برای پخت نان مسطح از انتقال گرمای مستقیم مشعل به خمیر استفاده می‌شود، به‌طوری‌که از انتقال گرمای همرفتی^۱ در سطح رویی خمیر و انتقال گرما به روش هدایت‌آدر سطح زیرین خمیر و در تماس با بستر پخت استفاده می‌شود. استفاده از این روش در پخت، علاوه بر غیریکنواختی توزیع حرارت و عدم پخت یکنواخت نان، باعث رسوب برخی ترکیبات شیمیایی از قبیل بنزوپیرن‌ها^۲ در سطح نان می‌شود که ناشی از احتراق ناقص سوخت و گازهای حاصل از فرآیند سوختن سوخت‌های فسیلی می‌باشد. عملکرد ماشین‌های با حرارت مستقیم منطبق با استانداردهای تولید بهداشتی نمی‌باشد. به دلیل اهمیت تعیین هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، تنظیم و رعایت حداکثر سطوح مجاز آن در مواد غذایی مانند غذاهای دودی مد نظر اتحادیه اروپا قرار گرفته است (فاسانو و همکاران ۲۰۱۶؛ سینگ و آگاروال ۲۰۱۸).

در این خصوص ری-سالگیورو و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر روش‌های مختلف برشته‌کردن شامل استفاده از حرارت مستقیم و غیرمستقیم را بر میزان PAHs در نان برشته شده ساندویچ ارزیابی کردند. نمونه‌های حاصل از پخت یا حرارت غیرمستقیم الکتریکی، بدون آلودگی و نمونه‌هایی که با زغال چوب و شعله گاز تهیه شده بودند، سطح بالای آلودگی مشاهده شد. مطالعه مشابهی نیز توسط الارشدان و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که سطح PAHs در نان برشته شده با مشعل گازی در بازه ۱/۰۶ تا ۴۴/۲۴ میکروگرم بر کیلوگرم قرار دارد. سینگ و آگاروال (۲۰۱۸) در مورد اندازه‌گیری PAHs در نان تست شده و اسماعیل‌زاد و همکاران (۲۰۱۶) در مورد

^۱ Convection^۲ Conduction^۳ Benzopyrene^۴ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

میزان بنزوپیرن در ۲۹ نمونه نان تهیه شده به روش سنتی و صنعتی تحقیقاتی انجام دادند.

نتایج بررسی‌های میدانی و مطالعات قبلی انجام شده در روش حرارت‌دهی مستقیم نشان داد که این روش ضمن آلاینده‌گی محصول و عدم یکنواختی پخت نان، دارای مصرف انرژی بالا و بازده عملکردی پایین بوده و کیفیت نان تولیدی پایین و ماندگاری آن کم می‌باشد. در گزینه جایگزین، یعنی استفاده از مکانیسم حرارت‌دهی غیرمستقیم، از منبع تابشی به همراه مقداری همرفت طبیعی استفاده می‌شود به طوری که در این سیستم پخت نان، از دو مبدل حرارتی و دو محفظه احتراق، در بالا و پایین بستر پخت نان استفاده می‌شود (شکل ۱-۱)، ولی عدم طراحی صحیح مبدل‌ها، موجب غیریکنواختی انتقال گرما و غیریکنواختی پخت نان می‌شود.

علی‌رغم اینکه حرارت‌دهی غیرمستقیم در صنعت بیسکویت نیز استفاده می‌شود، ولی پخت نان مسطح با این تکنولوژی نیازمند ویژگی‌های خاصی در طراحی قسمت‌های مختلف ماشین پخت به ویژه مبدل حرارتی است؛ چرا که زمان پخت در نان کوتاه و شدت حرارت-دهی بالا است. همان‌طوری که بیان شد در پخت با حرارت‌دهی غیرمستقیم، از تابش امواج مادون قرمز برای انتقال گرما استفاده می‌شود. مقدار گرمای منتقل شده از رادیاتورها به ماده هدف (نان)، تابعی از نوع طراحی مبدل حرارتی، زاویه فضایی یا جامد بین هدف و منبع و یا فاکتور شکل، جنس مبدل حرارتی، خصوصیات تابشی منبع تابش و نان یا خمیر می‌باشد. کنترل این عوامل صرفاً با استفاده از روش تجربی در ساخت مبدل حرارتی و بر مبنای آزمون و خطا، فرآیندی زمان‌بر، پر-هزینه و مشکل است. لذا برای دستیابی به یک سیستم پایا و قابل اعتماد که از لحاظ بهداشتی ایمن و محصولی با خواص حسی بالا تولید کن، باید شبیه‌سازی و مدل-سازی مبدل حرارتی و توسعه پروفیل‌های سرعتی صورت گرفته و معادلات حاکم بر پدیده در داخل مدل هندسی توسعه داده شده و حل شوند. به این طریق با

استفاده از شبیه‌سازی توسعه یافته می‌توان بهترین شرایط توزیع سرعت هوا و به تبع آن توزیع گرما در نقاط مختلف مبدل را از طریق تغییر طراحی مبدل و هندسه آن و تغییر موقعیت مکانی آن نسبت به بستر پخت تعیین نمود و در نهایت نسبت به ساخت، آزمون و ارزیابی ماشین پخت و تولید محصول اقدام کرد. این تکنیک در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار داشته و در اغلب فرآیندهای فرآوری مواد غذایی از این تکنیک برای شبیه‌سازی استفاده شده و در نهایت بهینه‌سازی فرآیند صورت می‌گیرد. همچنین از تکنیک شبیه‌سازی، برای تعیین پروفیل‌های دمایی در نان در حال پخت به صورت معادلات حاکم در حالت گذرا استفاده کرده‌اند.

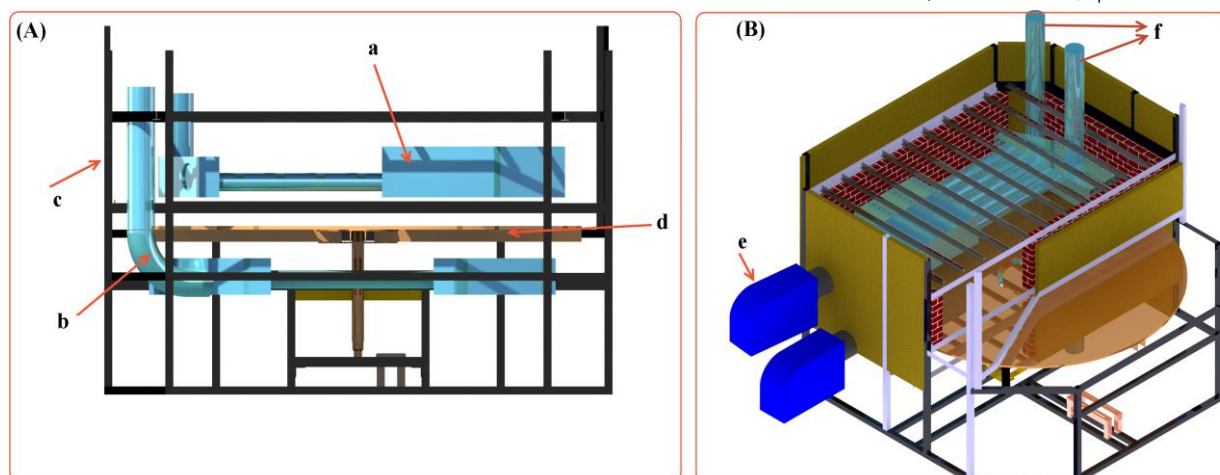
ردی و همکاران (۲۰۲۰) مقدار شار حرارتی روی سطح نان و نیز پروفیل‌های دمایی در نقاط مختلف نان را در طول فرآیند پخت با دمای 200°C شبیه‌سازی کردند. همچنین الناصر و همکاران (۲۰۲۰) انتقال گرما و جرم در حالت سه بعدی و گذرا در پخت نان با استفاده از آون با همرفت طبیعی و اجباری را شبیه‌سازی کرده و از شبیه‌سازی توسعه داده شده برای بهینه‌سازی فرآیند پخت استفاده نموده‌اند. همچنین تحقیقات زیادی توسط سایر محققین برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی انجام شده است (یون و همکاران ۲۰۱۴؛ میکاندان و همکاران ۲۰۱۸؛ مجدی و همکاران ۲۰۱۹).

هدف از این تحقیق تولید نان مسطح با استفاده از حرارت غیرمستقیم برای کاهش آلودگی نان و افزایش مشتری-پسندی آن می‌باشد که برای این منظور شبیه‌سازی مبدل حرارتی و طراحی و ساخت ماشین آن به همراه سایر قسمت‌های ماشین صورت گرفته و خواص حسی نان تولیدی اندازه‌گیری و با روش پخت سنتی و نیمه مکانیزه با حرارت مستقیم، مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت ماشین پخت نان

ماشین پخت نان با حرارت غیرمستقیم از شاسی، محفظه پخت، بستر پخت، دو عدد مبدل حرارتی، دو عدد مشعل و سیستم چرخش بستر پخت تشکیل شده است.



شکل ۱- اجزای مختلف ماشین پخت: a: مبدل حرارتی بالایی، b: مبدل حرارتی پایینی، c: شاسی اصلی، d: بستر پخت، e: مشعل، f: دودکش مبدل

Figure 1- Different components of the baking machine; a: upper heat exchanger, b: lower heat exchanger, c: main chassis, d: baking bed, e: burner, f: chimney exchanger

کیلووات با ورودی تک فاز و خروجی سه فاز استفاده شد. به منظور پخت نان با حرارت غیرمستقیم، لازم بود دو مبدل حرارتی متناسب با ابعاد و شکل محفظه پخت نان طراحی شده و در بالا و پایین صفحه چدنی در فاصله مناسب نصب شوند (شکل ۱-A) که جزئیات نحوه طراحی آنها در بخش بعد ارائه شده است.

برای عایق‌کاری سقف و کف محفظه پخت نان از ترکیب پرلیت و سیمان سفید استفاده شد. همچنین برای عایق‌کاری محفظه پخت یک لایه آجر نسوز و یک لایه پشم-سنگ تواماً در دیوارهای عمودی نصب شد (شکل ۱-B). دیوارهای بیرونی و جانبی ماشین نیز با ورق فولادی به ضخامت دو میلی‌متر پوشانده شد. محور چرخ و فلک از یک پروفیل فولادی با مقطع دایره‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر و به طول ۶۸۰ میلی‌متر ساخته شد که روی دو عدد بلبرینگ P 212 و P 30311 سوار شدند.

بستر پخت ماشین دارای ۸ عدد صفحه چدنی بود که با در کنار هم قرارگرفتن آنها، بستر دایره‌ای کاملی به قطر ۲۲۰ سانتی‌متر روی چرخ و فلک تشکیل می‌شود (شکل ۱-A). صفحات چدنی از جنس چدن خاکستری بوده و به روش قالب‌گیری و ریخته‌گری تولید شدند که برای پف‌کردگی نان لواش روی آنها حفره‌هایی با قطر ۱۰ میلی‌متر تعبیه شد. برای سیستم چرخش بسترپخت و مجموعه چرخ و فلک از یک الکتروموتور سه فاز با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه (الکتروژن-ایران) و توان ۱/۵ کیلووات استفاده شد. محدوده سرعت چرخش بستر پخت در حالت معمولی بین ۲ الی ۴ دور در دقیقه می‌باشد. برای کاهش سرعت دورانی از الکتروموتور تا بستر پخت، از یک گیربکس با نسبت یک به صد و یک سیستم انتقال توان با تسمه و پولی با نسبت یک به سه استفاده شد. برای تغییر سرعت دورانی الکتروموتور، از یک اینورتر (LS تیپ IC5 ساخت کشور کره) با توان ۱/۵

دودکش خروجی (e) تشکیل شده است (شکل ۲-۲A). مشعل این مبدل در ابتدای لوله ورودی سوار می‌شود. این مشعل توانایی تولید شعله‌ای با دمای حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۱۰۰ را داشت. مبدل حرارتی پایین نیز دارای ساختمان مشابه بود که در شکل ۲-۲B قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده است. در فاز اول، این دو مبدل به صورت مجزا و کاملاً مستقل ساخته شدند و سیستم دارای ۲ عدد مشعل بود.

شبیه‌سازی انتقال ممنتوم در مبدل‌های حرارتی

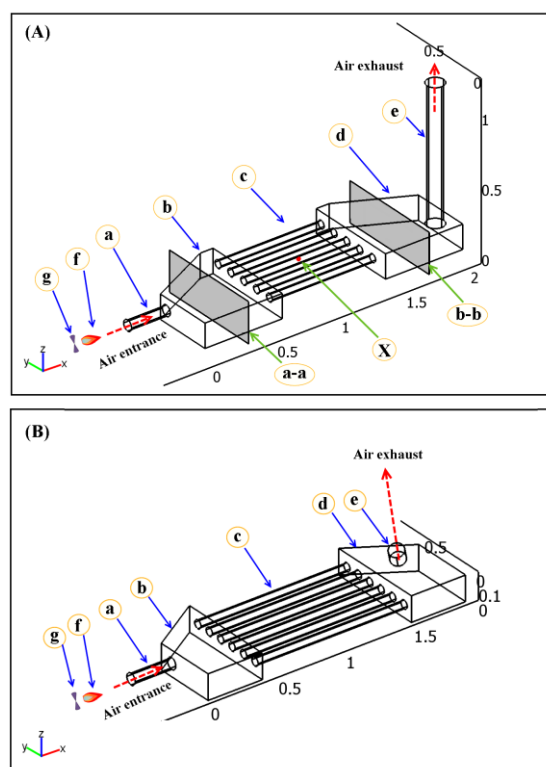
مبدل حرارتی بایستی قادر باشد انتشار گرمای یکسانی در مقطع عرضی خود تولید کند بنابراین قبل از ساخت، به منظور بررسی یکنواختی توزیع سرعت هوا در مبدل‌های حرارتی طراحی شده، فرآیند انتقال ممنتوم در این مبدل‌ها شبیه‌سازی شد تا با بررسی پروفیل‌های سرعت هوا در نقاط مختلف آن‌ها و در صورت لزوم با تغییر در طراحی مبدل‌ها بتوان به توزیع یکنواخت‌تر سرعت هوا دست یافت. ذکر این نکته حائز اهمیت است که توزیع یکنواخت سرعت هوا منجر به توزیع یکنواخت دمای هوای داخل مبدل و دمای سطح مبدل نیز می‌گردد. اگر سطوح مبدل در نقاط مختلف مقطع عرضی آن، دارای دمای یکسانی باشند، شار گرمایی یکسانی نیز به صورت تابشی انتقال داده و در نهایت فرآیند پخت یکنواخت‌تری روی بستر پخت ایجاد خواهد شد.

شبیه‌سازی مبدل حرارتی بالایی - طرح اول: برای انجام شبیه‌سازی انتقال ممنتوم در مبدل‌های حرارتی، گام اول ترسیم هندسه مساله و تعیین فضای محاسباتی می‌باشد. بنابراین شکل هندسی مبدل حرارتی بالایی مطابق شکل ۳-۲A در محیط نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS به صورت سه بعدی ترسیم شد که ابعاد آن مطابق فضای در دسترس در داخل تنور پخت و بستر پخت بود. به منظور سهولت محاسبات و کاهش زمان تحلیل مساله، از ضخامت جداره بدنه مبدل حرارتی صرف‌نظر شد.

همان‌طوری‌که بیان شد، لازم بود دو مبدل حرارتی، یکی در بالا و یکی در پایین بستر پخت چدنی قرار گیرند تا انتقال حرارات به صورت تابش به بستر صورت گیرد. همان‌طوری‌که در شکل ۱ آورده شده است، شعله حاصل از احتراق توسط مشعل، به ورودی و محفظه داخلی مبدل‌ها فرستاده شده و موجب گرم شدن بدنه مبدل‌ها می‌شود. به دلیل دمای بالای سطح مبدل‌ها، آنها شروع به تابش می‌کنند و بستر پخت را گرم می‌نمایند. با توجه به ابعاد ماشین پخت، مبدل‌ها باید طوری طراحی می‌شدند که ضمن امکان قرارگیری در فضای موجود در داخل ماشین پخت بتوانند حرارت یکنواختی به بستر پخت انتقال دهند. البته باید توجه داشت که بستر پخت که نان روی آن قرار می‌گیرد به صورت افقی چرخش می‌کند. بنابراین باید توزیع دما و تابش مبدل‌ها به نحوی باشد که در طول چرخش حدود 360° درجه‌ای خمیر روی بستر و داخل ماشین، پخت تمام قسمت‌های نان لواش با ابعاد 30×50 سانتی‌متر، حرارات یکنواختی دریافت کرده و پخت آن به صورت یکنواخت باشد. بر این اساس مبدل‌های حرارتی اولیه مطابق شکل ۲ طراحی شدند.

از طرف دیگر طرح و ابعاد مبدل‌ها نباید طوری می‌شد که موجب گرم‌شدن بیش از اندازه چدن در مناطقی خارج از محل قرارگیری خمیر و نان شود؛ چرا که در همه نواحی پخت صورت نگرفته و گرمای اکتسابی چدن، صرف گرمای نهان تبخیر و پخت نمی‌شود. بنابراین پس‌ماند یا هیسترزیس حرارتی ایجاد شده و انباشت حرارتی صورت می‌گیرد. در این صورت در حالتی که انتهای هر قطعه خمیر در حین پخت با این نواحی در تماس باشد حرارت بالایی دریافت کرده و موجب پخت بیش از حد و سوختن نان در نواحی انتهایی می‌گردد. این مورد در حال حاضر مشکل اکثریت ماشین‌های پخت نان با حرارت غیرمستقیم در کشور است.

مبدل حرارتی بالایی از یک لوله ورودی (a)، محفظه ورودی (b)، لوله‌های میانی (c)، محفظه خروجی (d) و لوله

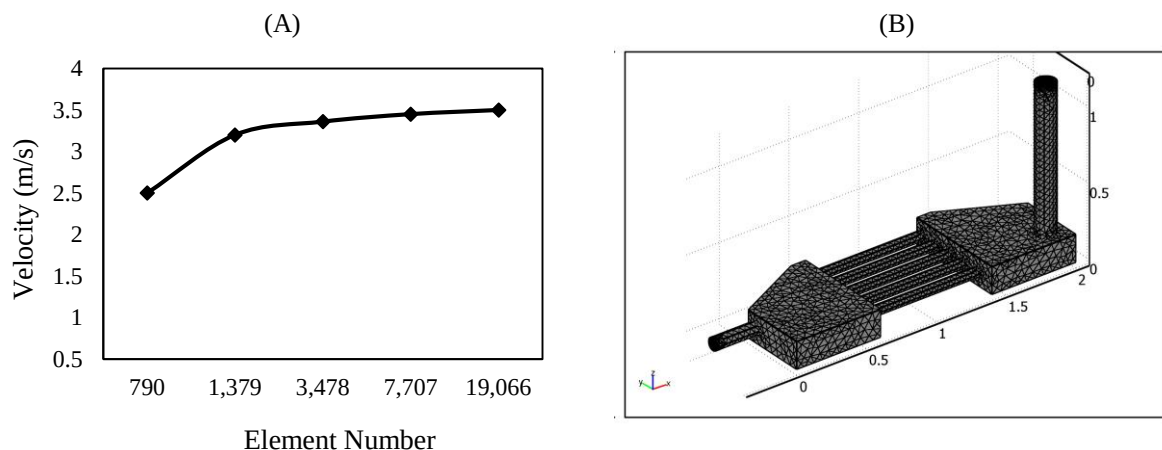


شکل ۲- مبدل‌های حرارتی طرح اول A: مبدل حرارتی بالایی B: مبدل حرارتی پایینی؛ a: لوله ورودی، b: محفظه ورودی، c: لوله‌های میانی، d: محفظه خروجی، e: لوله دودکش خروجی، f: مشعل و g: دمنده مشعل

Figure 2- Heat exchangers of the first design A: Upper heat exchanger B: Lower heat exchanger; a: inlet pipe, b: inlet chamber, c: middle pipes, d: outlet chamber, e: outlet chimney pipe, f: burner and g: burner blower

نهایت مبدل حرارتی مورد نظر با ۱۳۳۷۵ المان تحلیل گردید (شکل ۳-B).

گسسته‌سازی فضای محاسباتی: فضای محاسباتی ترسیم شده با استفاده از المان‌های چهاروجهی گسسته‌سازی شد. برای مطالعه استقلال شبکه از مش‌بندی، ابتدا فضای محاسبات با ۷۹۰ المان گسسته‌سازی و مساله تحلیل شد و سرعت هوا در نقطه X (مرکز لوله‌های میانی) در شکل ۲-A بدست آمد. پس از آن، تعداد المان‌ها به ۱۳۷۹، ۳۴۷۸، ۷۰۷۰ و ۱۹۰۶۶ مورد افزایش داده شد و مساله مجدد تحلیل گردید. تعداد المانی که در آن، سرعت هوا در نقطه X با افزایش تعداد المان‌ها تغییر نکرد (۷۰۷۰ المان) به عنوان المان بهینه انتخاب شد (شکل ۳-A). پس از تعیین تعداد بهینه المان و به منظور کاهش گرادیان سرعت از المان‌های کوچک‌تر برای المان‌بندی مکان‌های حساس مانند دریچه‌های ورودی و خروجی هوا و نیز لوله‌های میانی مبدل استفاده شد.



شکل ۳- مبدل حرارتی بالایی- طرح اول؛ A: نمودار بررسی استقلال شبکه و B: المان بندی فضای محاسباتی
Figure 3- Mesh independence investigation diagram of upper heat exchanger - first design

عدد رینولدز در دریچه ورودی هوا، مقطع a-a، b-b و در لوله میانی به ترتیب ۶۱۸۳، ۶۲۲۳، ۳۸۴۸۸ و ۵۱۲۵۲ به دست آمد که نشان دهنده وجود جریان متلاطم در مبدل می باشد. به همین دلیل برای شبیه سازی انتقال ممنوم از معادلات ناویر- استوکس با میانگین گیری عدد رینولدز (RANS) استفاده شد. این روش شامل دو نوع مدل متلاطم شامل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ می باشد که در این تحقیق از مدل جریان متلاطم $k-\epsilon$ استفاده شد. این مدل یکی از رایج ترین مدل های مطالعه جریان متلاطم در کاربردهای صنعتی می باشد. در این مدل فرض شده است که سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم می باشد. بنابراین معادلات حاکم در آن شرایط به صورت روابط ۳ و ۴ در نظر گرفته شد که به ترتیب شامل معادلات پیوستگی و انتقال ممنوم می باشند.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad [3]$$

$$\rho_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_a (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \left[-PI + (\eta + \eta_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \quad [4]$$

مدل $k-\epsilon$ شامل دو معادله انتقال و دو متغیر وابسته دیگر است که عبارت از انرژی جنبشی متلاطم و نرخ تلفات متلاطم می باشند و از معادلات ۵، ۶، ۷ و ۸ محاسبه شدند.

در این روابط:

معادلات حاکم: برای تعیین مدل انتقال ممنوم ابتدا باید رژیم جریان مشخص می شد. بنابراین عدد رینولدز در نقاط مختلف مبدل حرارتی و نیز در محل اتصال به مشعل (a در شکل ۲) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. برای دستیابی به تغییرات عدد رینولدز در داخل مبدل، دو برش عرضی a-a و b-b به فاصله ۰/۶ و ۲ متری از محل دریچه اتصال به مشعل (شکل ۲-A) تهیه شد. سرعت هوا (U) به صورت نسبت دبی هوای گرم بر مساحت مقطع مورد نظر و قطر هیدرولیکی (D) نیز از رابطه ۲ محاسبه شد. همچنین ماکزیمم عدد رینولدز در لوله های میانی نیز با در نظر گرفتن حداکثر سرعت هوای قابل حصول در این لوله ها محاسبه شد.

$$Re = \frac{\rho_a U D}{\eta} \quad [1]$$

$$D = \frac{4A}{P_p} \quad [2]$$

در این روابط:

Re: عدد رینولدز (بدون واحد)، p_a : دانسیته هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)، U: سرعت هوا (متر بر ثانیه)، D: قطر هیدرولیکی (متر)، η : ویسکوزیته دینامیک هوا (پاسکال در ثانیه) A: مساحت مقطع مورد نظر (متر مربع) و P_p : محیط مقطع مورد نظر (متر) می باشد.

شرایط مرزی برای حل مدل انتقال ممنتوم در جدول ۱
ارایه شده است. خواص ترموفیزیکی هوا نیز برابر
خواص هوای خشک در نظر گرفته شد.

حل مساله: برای حل عددی معادلات انتقال ممنتوم در
فضای محاسباتی حاکم، از نرم‌افزار COMSOL
MULTIPHYSICS 3.5 و تحلیل‌گر Direct
(UMFPACK) و با استفاده از یک واحد pc با رم معادل
۱۶ گیگا بایت استفاده شد. در حل مساله گام‌های زمانی
به صورت متغیر از ۰/۱ الی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

u: سرعت هوا (متر بر ثانیه)، t: زمان (ثانیه)، P: فشار
(پاسکال)، η_T : ویسکوزیته متلاطم (پاسکال در ثانیه)، k_T :
انرژی جنبشی متلاطم (متر مربع بر مجذور ثانیه)، ε : نرخ
تلفات متلاطم (متر مربع بر مکعب ثانیه) می‌باشند.
ضرایب ثابت مدل در معادلات مذکور عبارتند از:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09 \\ C_{\varepsilon 1} &= 1.44 \\ C_{\varepsilon 2} &= 1.92 \\ \sigma_k &= 1 \\ \sigma_\varepsilon &= 1.3 \end{aligned}$$

$$\rho_a \frac{\partial k_T}{\partial t} + \rho_a u \cdot \nabla k_T = \nabla \left[(\eta + \eta_T / \sigma_k) \nabla k_T \right] + \eta_T P(u) - \rho_a \varepsilon \quad [5]$$

$$\rho_a \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_a u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \left[(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \eta_T P(u) / k_T - C_{\varepsilon 2} \rho_a \varepsilon^2 / k_T \quad [6]$$

$$\eta_T = \rho_a C_\mu k_T^2 / \varepsilon \quad [7]$$

$$P(u) = \nabla u \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) \quad [8]$$

جدول ۱- شرایط مرزی مدل انتقال ممنتوم

Table 1- Boundary conditions of momentum transmission model

Boundary condition	Value or Condition
Inlet: Velocity	$u = u_0$ $n \cdot u = 0$ $n \cdot (\eta + \eta_T) (\nabla u + (\nabla u)^T) n = \left[\rho_a C_\mu^{0.25} k_T^{0.5} / (\ln(\delta_w^+) / k_T + C^+) \right] uu = 0$
Wall: Logarithmic wall function	$n \cdot \nabla k_T = 0$ $\varepsilon = C_\mu^{0.75} k_T^{1.5} / (k_T \delta_w)$ $\delta_w^+ = \delta_w \rho_a C_\mu^{0.25} k_T^{0.5} / \eta$ $\delta_w^+ = h / 2$
Outlet: Velocity	$u = u_0$ $n \cdot \nabla k_T = 0$ $n \cdot \nabla \varepsilon = 0$

مطالعه استقلال شبکه از مش‌بندی، با ۱۲۳۴۵ المان انجام
شد.

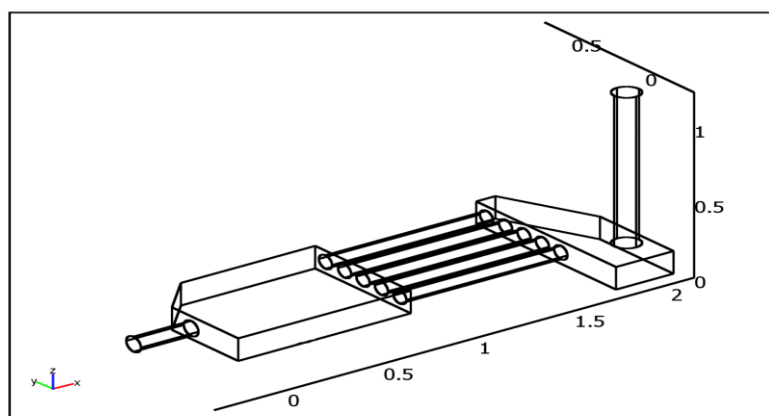
شبیه‌سازی انتقال ممنتوم در مبدل حرارتی بالایی-
طرح دوم: نتایج شبیه‌سازی مبدل حرارتی بالایی در
طرح اول (شکل ۲-A) نشان داد که توزیع سرعت هوا در
نقاط مختلف مبدل، غیریکنواخت می‌باشد. به‌خصوص در
نقاط مختلف لوله‌های میانی مبدل، تفاوت مشهودی بین

شبیه‌سازی مبدل حرارتی پایینی- طرح اول: همان-
طوری‌که در بخش‌های قبلی بیان شد ماشین پخت دارای
یک مبدل در پایین بستر پخت می‌باشد که طرح اولیه آن
در شکل ۱ و ۲-B نشان داده شده است. این مبدل نیز
مشابه مبدل بالایی شبیه‌سازی شد تا پروفیل‌های سرعت
هوا در نقاط مختلف آن به دست آید. کلیه مراحل شبیه-
سازی مطابق روش ارایه شده در بخش قبلی و با لحاظ

نتایج آن در بخش نتایج ارایه شده است. بنابراین طرح دوم به عنوان طرح بهینه برای مبدل بالایی انتخاب شد. شبیه‌سازی مبدل حرارتی پایینی- طرح دوم: نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد علی‌رغم توزیع نسبتاً یکنواخت سرعت هوا در لوله‌های میانی مبدل پایینی (شکل B-۲) (تفاوت کمتر از ۰/۱۵ متر بر ثانیه)، سرعت هوا در لوله‌ها نسبتاً پایین بود که این امر موجب کاهش ضریب انتقال گرمای سطحی از هوای گرم به سطوح داخلی مبدل می‌شود. بنابراین در طراحی این مبدل نیز تغییراتی اعمال شد تا بتوان سرعت هوا در لوله‌ها را افزایش داد. در طرح دوم طول محفظه ورودی هوا (b) در شکل B-۲ از ۰/۴ متر به ۰/۶ متر و قسمت خروجی هوا (d) در همان شکل از ۰/۴ به ۰/۷ متر افزایش داده شد (شکل ۵). شبیه‌سازی با ۱۲۴۳۱ المان با گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سرعت هوا در لوله‌های میانی از ۱/۴۸ به ۳ متر بر ثانیه افزایش یافت.

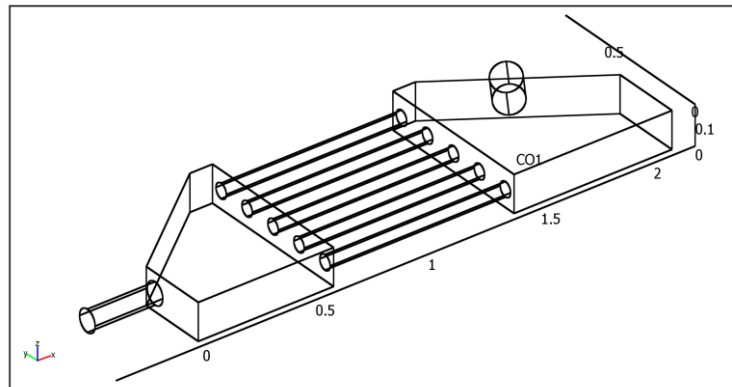
سرعت هوا دیده می‌شد. بیشترین سرعت هوا برابر ۴/۰۴ و کمترین مقدار آن معادل ۲/۲ متر بر ثانیه حاصل شد که نتایج آن به تفصیل در بخش نتایج گزارش شده است. تفاوت در سرعت هوا منجر به تفاوت دمای هوا در نقاط مختلف مبدل شده و در نتیجه آن انتقال گرما از هوای گرم به دیواره داخلی مبدل و نیز مقدار تابشی ساطع شده از سطوح بیرونی مبدل به بستر پخت غیریکنواخت خواهد شد. لذا طرح مبدل حرارتی بالایی به نحوی تغییر داده شد تا توزیع هوا یکنواخت‌تر گردد. در طرح دوم مبدل حرارتی بالایی، طول قسمت ورودی مبدل (b) در شکل A-۲ از ۶۰ سانتی‌متر به ۹۰ سانتی‌متر افزایش و طول قسمت خروجی آن (d) در شکل A-۲ از ۶۰ به ۳۰ سانتی‌متر کاهش داده شد (شکل ۴).

شبیه‌سازی انتقال ممنوم در مبدل حرارتی جدید مشابه روش ارایه شده در بخش‌های قبل انجام شد. فضای محاسباتی جدید با ۱۱۶۱۱ المان گسسته‌سازی شد و با اعمال معادلات ۳ الی ۸ و شرایط مرزی جدول ۱ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد توزیع سرعت هوا در مبدل حرارتی طرح دوم دارای یکنواختی بسیار بالایی است که



شکل ۴- مبدل حرارتی بالایی- فضای محاسباتی طرح دوم

Figure 4- Upper heat exchanger - Computing domain of second design

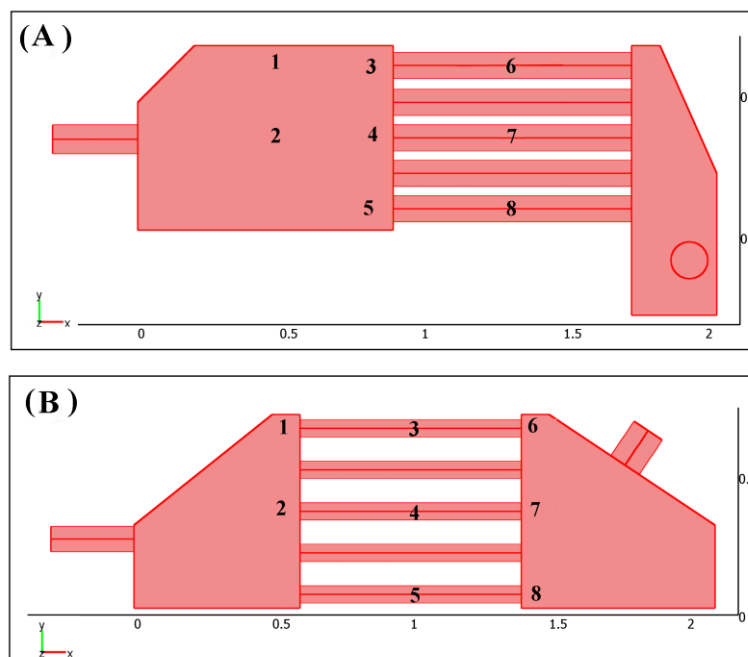


شکل ۵- مبدل حرارتی پایینی- فضای محاسباتی طرح دوم

Figure 5- Lower heat exchanger - computing domain of second design

توسط نرم‌افزار با سرعت هوای اندازه‌گیری شده در داخل لوله‌های مبدل در نقاط مندرج در شکل ۶ و با استفاده از سرعت‌سنج سیم داغ مقایسه شدند. در زمان اندازه‌گیری سرعت جریان هوای گرم، مبدل‌ها در داخل ماشین نصب و مشعل‌ها در حال کار بودند. انحراف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده معیار دقت شبیه‌ساز توسعه داده شده در نظر گرفته شد.

اعتبارسنجی شبیه‌ساز توسعه‌یافته: بعد از انتخاب طرح نهایی مبدل‌ها، هر دوی آنها با ورق فولادی SS310 به ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شدند. انتخاب SS310 با توجه به دمای کاری مشعل‌ها که حدود 1100°C می‌باشد، صورت گرفت. به هر کدام از مبدل‌ها یک مشعل روی لوله ورودی آنها نصب شد. برای بررسی اعتبار شبیه‌ساز توسعه داده شده، سرعت هوای پیش‌بینی شده



شکل ۶- محل اندازه‌گیری دما و سرعت هوا در مبدل‌های ساخته شده: A: مبدل بالایی و B: مبدل پایینی

Figure 6- Location for measuring temperature and air velocity in built-in exchangers; A: upper exchanger and B: lower exchanger

آزمون و ارزیابی کیفیت نان تولید شده با ماشین حرارت غیرمستقیم

پس از ساخت و تکمیل ماشین، ارزیابی آن با عملیات پخت نان با آرد سبوسگیری شده ۱۸٪، انجام شد. برای این منظور خمیر نان غیرحجمی لواش مطابق عرف صنعت و بازار تهیه و توسط اپراتور مجرب پخت شد. همچنین به طور همزمان پخت نان در ماشین های پخت با حرارت مستقیم و با همان خمیر انجام شد و هر دو نان- های تولید شده در داخل کیسه های پلی اتیلنی دو لایه و در شرایط یکسان در یخچال با دمای °C ۱۵ نگهداری شدند. برای بررسی روند تغییرات فیزیکی و حسی نان- های تولید شده، در همان روز پخت و نیز ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۱۶۸ ساعت پس از پخت، تحت آزمون های حسی (taste پانل توسط افراد مجرب) قرار گرفتند. بدین صورت تغییرات کیفی نان در طول نگهداری محصول اندازه گیری شد و روند تغییرات کیفی هر کدام از نان ها تعیین شد.

اندازه گیری دمای هوا و دمای سطح مبدل در نقاط مختلف: پس از اعتبارسنجی شبیه ساز توسعه یافته و انتخاب مبدل های منتخب و ساخت آنها، دمای هوا در مرکز لوله ها و در نقاط ۶، ۷ و ۸ (شکل ۶) و دمای سطح مبدل بالایی در همان نقاط به وسیله ترموکوپل نوع K اندازه گیری شد تا یکنواختی دمای سطح مبدل در مقاطع عرضی آن بررسی شود. همچنین دمای کاری مشعل، دمای هوای خروجی و نیز دمای بدنه لوله خروجی هوا نیز اندازه گیری شد و با استفاده از معیارهای آماری، یکنواختی آنها بررسی شد.

جدول ۲- خواص مورد ارزیابی و ضرایب وزنی آنها و امتیازهای داده شده توسط ارزیاب ها به خصوصیات کیفی نان

Table 2- Sensory attributes and their calculated weights and assigned scores by a sensory panel for the quality characteristics of flatbread

Attributes	Weight coefficients (P)	Baking method	Mean sensory evaluation scores (G)				
			Baking day	24 h after baking	48 h after baking	72 h after baking	168 h after baking
Form and shape acceptability	4	A ^a	4.25	4.00	3.83	3.63	3.63
		B ^b	4.33	4.04	4.25	4.00	3.92
Upper-level appearance acceptability	3	A	4.50	4.13	3.42	4.00	3.92
		B	4.42	4.29	4.33	4.25	4.00
Subsurface appearance acceptability	3	A	4.08	3.88	3.67	3.83	3.50
		B	3.83	3.83	4.00	4.00	3.92
Texture -porosity intensity	2	A	4.25	4.06	3.79	3.63	3.63
		B	3.42	3.08	3.33	3.17	3.04
Texture – hardness intensity	2	A	3.83	3.71	3.25	3.17	3.17
		B	3.33	3.73	3.54	3.54	3.29
Chew ability acceptance	1	A	4.50	4.13	3.83	3.58	3.67
		B	3.58	3.33	3.25	2.92	2.58
Flavour, taste, odour acceptance	5	A	4.42	4.23	3.88	3.79	3.88
		B	3.50	3.58	3.08	2.88	2.71

^a A: Indirect heat baking method; ^b B: Conventional (direct heat) baking method

در این رابطه P: ضریب وزنی هر مشخصه، G: متوسط امتیاز داده شده توسط ارزیاب‌ها برای هر مشخصه و Q: امتیاز کلی هر نمونه نان در کل ویژگی‌ها و در زمان مورد نظر است. قابل ذکر است شرایط و محیط انجام ارزیابی نمونه‌ها برای کلیه ارزیاب‌ها کاملاً یکسان در نظر گرفته شد. در نهایت امتیاز کلی هر نمونه نان پخته شده به وسیله ماشین حرارت مستقیم و غیرمستقیم و در پایان بازه‌های زمانی مختلف با یکدیگر مقایسه و روند تغییرات کیفیت کل نان مشخص شد.

تحلیل آماری

پس از انجام ارزیابی حسی، داده‌های حاصل از هر کدام از آزمون‌ها، بر اساس طرح کاملاً تصادفی در قالب آزمایش فاکتوریل تحلیل شدند. فاکتورهای مورد مطالعه شامل روش پخت نان (A و B) و مدت زمان نگهداری نان بود. تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار MSTATC انجام و مقایسه‌های میانگین‌ها نیز با آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

مشخصات ماشین پخت نان ساخته شده

مشخصات ماشین پخت نان با حرارت غیرمستقیم در جدول ۳ آورده شده است. این ماشین قادر است با تغییر فرکانس برق ورودی، دور دورانی بستر پخت و متناسب با آن زمان پخت نان را تنظیم نماید طوری که درجه پخت نان مورد قبول نانوائی خبره باشد.

ارزیابی خواص حسی نان توسط taste پانل: در انجام ارزیابی حسی، از ۱۵ نفر ارزیاب نیمه آموزش دیده درخواست شد تا با در نظر گرفتن معیارهای کیفی نان و بر اساس استاندارد ۷۴-۳۰/۰۱ AACC (بی‌نام، ۲۰۰۰)، کیفیت محصول را در همان روز پخت، پس از گذشت زمان ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۱۶۸ ساعت بعد از پخت، ارزیابی کرده و امتیازهایی را از عدد یک (بسیار بد) تا عدد ۵ (بسیار خوب) به هر خصوصیت حسی اختصاص بدهند. همچنین بر اساس ارزش خصوصیات مذکور در کیفیت و مشتری پسندی نان، ضرایب وزنی متناسب به هر کدام از خصوصیات داده شد. خواص مورد ارزیابی و ضرایب وزنی آن در جدول ۲، آورده شده است. اعداد بزرگتر ضرایب وزنی، بیانگر اهمیت بیشتر آن مشخصه در ارزیابی کیفیت نان است.

هر کدام از اعداد مندرج در جدول ۲ بیانگر ارزش کیفی کلی و نهایی آن مشخصه در زمان مورد نظر است که مقدار آن از متوسط‌گیری امتیازات ارایه شده در هر خصوصیت و در هر زمان توسط ارزیاب‌ها حاصل شد (G). همچنین مقبولیت کلی هر نوع نان و در هر کدام از زمان‌های مختلف نگهداری از طریق رابطه ۹ و با اعمال ضرایب وزنی هر خصوصیت محاسبه شد.

$$Q = \frac{\sum(P \times G)}{\sum P} \quad [9]$$

جدول ۳- مشخصات ماشین پخت نان با حرارت غیرمستقیم

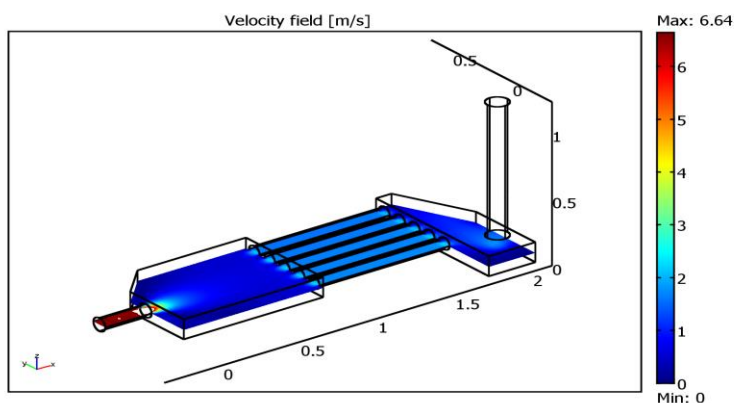
Table 3- Specifications of the indirect flatbread baking machine designed in this study

Characteristics	Specifications
Length, width and height	250, 250 and 180 cm
Mass	1700 kg
Fuel consumption	Natural gas
Electric motor	1.5 hp (three phase)
Gearbox ratio	1 to 64
Power transmission system	Gearbox + pulley belt
Insulation	40 mm thick rock wool
Baking bed	Cast iron plates with a thickness of 18 mm
Baking bed diameter	220 cm
Burner	Iran radiator 1 155000 kcal/ h
Control system of the baking bed rotation speed	Single-phase to three-phase inverter Ls brand

نتایج شبیه‌سازی مبدل حرارتی بالایی

نتایج ارزیابی و مطالعه پروفیل سرعت هوا در طرح اول مبدل بالایی نشان داد که توزیع سرعت در نقاط مختلف در لوله‌های میانی مبدل بسیار غیریکنواخت بود که این امر موجب تغییر درجه حرارت کاری در نقاط مختلف شده و به تبع آن پخت غیریکنواخت را موجب می‌شود. بنابراین مبدل حرارتی بالایی به منظور بهبود توزیع سرعت هوا تحت طراحی مجدد قرار گرفت. نتایج ارزیابی مبدل جدید بالایی در شکل ۷ آورده شده است. چنان‌که

مشاهده می‌شود با تغییر ابعاد مبدل در قسمت‌های مخزن اولیه (a) و مخزن ثانویه هوا (d)، توزیع هوا در این مبدل یکنواخت‌تر شد. به این ترتیب هوا به صورت تقریباً مساوی بین لوله‌های میانی و سایر قسمت‌های مبدل توزیع شد که یکنواختی مذکور مشاهده می‌شود. سرعت هوا در مرکز لوله‌های میانی مبدل با انحراف استاندارد ۰/۰۵ در محدوده ۱/۵۹۲ الی ۱/۷۲ متر بر ثانیه قرار داشت که نسبت به مبدل طرح اول، یکنواختی قابل توجهی به دست آمد.

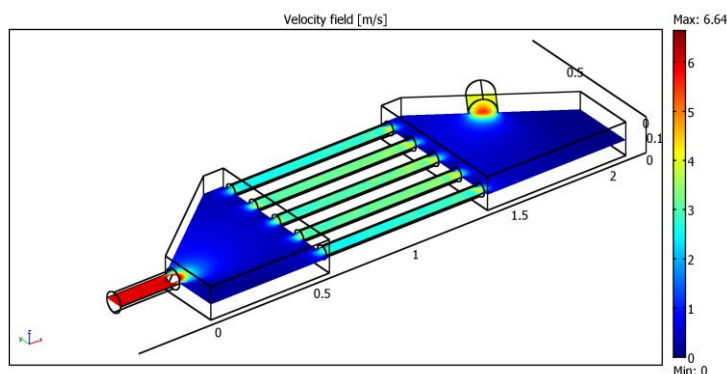


شکل ۷- پروفیل توزیع سرعت هوا در نقاط مختلف مبدل حرارتی بالایی منتخب

Figure 7- Air velocity distribution profile in different parts of the selected upper heat exchanger

همانند مبدل بالایی، مطالعه پروفیل سرعت هوا در مبدل حرارتی پایینی نشان داد که برخلاف طرح اول مبدل بالایی توزیع نسبتاً یکنواخت هوا در این مبدل وجود داشت. سرعت هوا در برش عرضی محفظه‌های ورودی و خروجی بین ۰ الی ۱ متر در ثانیه قرار داشت و

انحراف استاندارد بین مقادیر سرعت در نقاط مختلف آن، ۰/۰۳ بود. با این وجود، به دلیل لزوم تطابق طرح مبدل پایینی با فضای پخت، طرح مبدل پایینی نیز تغییر داده شد. این تغییرات موجب افزایش جریان هوای گرم در لوله‌های میانی مبدل شد (شکل ۸).



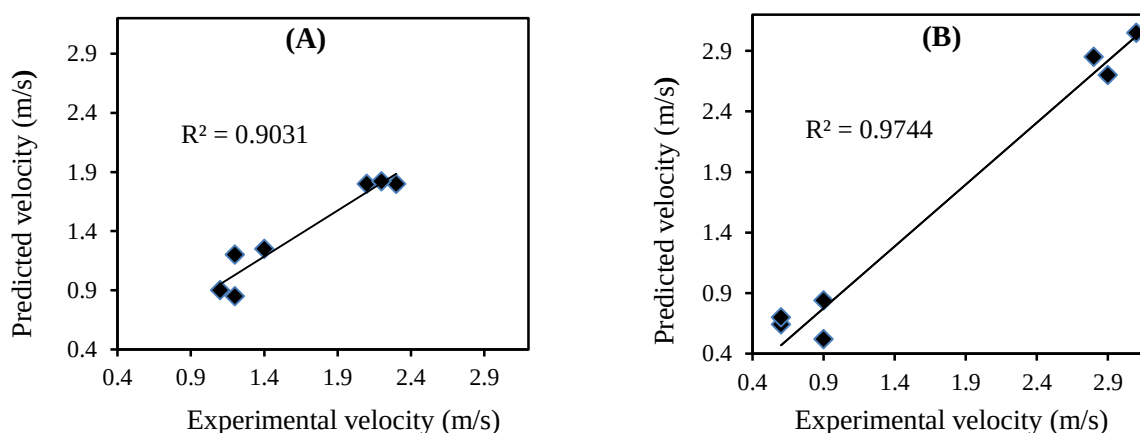
شکل ۸- توزیع سرعت هوا در نقاط مختلف مبدل حرارتی پایینی منتخب

Figure 8- Air velocity distribution in different parts of the selected lower heat exchanger

آزمایش‌های تجربی و اعتبارسنجی مدل

مبدل‌های حرارتی منتخب، ساخته شد و در محفظه بالا و پایین بستر پخت نصب شدند. اندازه‌گیری تجربی سرعت جریان هوای گرم در ۸ نقطه و مقایسه آنها با سرعت هوای پیش‌بینی شده توسط شبیه‌ساز صورت گرفت. از مقادیر معیارهای آماری R^2 و RMSE برای بیان میزان تطابق داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شد. بطوری‌که مقادیر مربوطه به ترتیب ۰/۹ و

۰/۳۶ به دست آمد (شکل ۹-۱). در مبدل پایین نیز شرایط مشابهی حاکم بود و شبیه‌ساز از دقت خوبی در پیش‌بینی سرعت هوای گرم در مبدل برخوردار بود (شکل ۹-۲). R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۲۱۸ محاسبه شد. نتایج تجربی به دست آمده تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌ساز داشت و استفاده از شبیه‌ساز توانسته بود در طراحی و ساخت مبدل‌ها موثر واقع شود.



شکل ۹- اعتبارسنجی پروفیل‌های سرعتی در مبدل‌های منتخب؛ A: مبدل بالایی و B: مبدل پایینی

Figure 9- Validation of air velocity in selected exchangers; A: upper exchanger and B: lower exchanger

جدول ۴- دمای هوا و دمای سطح مبدل حرارتی بالا

Table 4- Air and surface temperatures of the upper heat exchanger

Measuring point	Air temperature in the center of the pipe (°C)	Pipe surface temperature (°C)
6	310	865
7	410	950
8	320	796
Outlet pipe	200	560

نتایج ارزیابی حسی

با استفاده از امتیازهای داده شده توسط اعضای پانل به خصوصیات کیفی نان، شاخص کیفیت نهایی نان در هر دو روش پخت و در طول مدت زمان نگهداری نان محاسبه شد. نتایج تجزیه واریانس اثر روش پخت (A) و مدت زمان نگهداری نان روی شاخص کیفی کلی نان نشان داد که اثر هر دو عامل اصلی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد (جدول ۵). نان پخته‌شده با حرار

بنابراین به دلیل یکنواختی بردارهای سرعت هوای گرم، انتظار می‌رود دمای نقاط مختلف موجود روی مقطع عرضی مبدل هم یکنواخت باشد و موجب پخت یکنواخت-تر نان گردد. در جدول ۴ دمای هوای گرم عبوری از مبدل در تعدادی نقاط آن و نیز دمای سطح و بدنه مبدل ساخته شده در همان نقاط آورده شده است. انحراف استاندارد دمای سطح در مقاطع عرضی مبدل بالایی حدود ۴۵ °C بود که برای اهداف این تحقیق و در عملیات پخت نان یکنواختی مناسبی می‌باشد. پس از حصول یکنواختی مورد نظر، مبدل‌های ساخته شده در ماشین نصب شدند و نسبت به پخت نان اقدام شد. نتایج و مشاهدات عینی نشان داد مبدل‌ها از نظر توان گرمایشی، توانایی پخت نان در حدود ۱۶ تا ۱۹ ثانیه در طول چرخش بستر را دارا می‌باشند.

نان B بعد از ۱۶۸ ساعت نگهداری، آثار کپک‌زده‌گی نیز مشاهده شد. این در حالی است که در نان A بعد از ۴۸ ساعت، تغییرات محسوسی در کیفیت نان مشاهده نشد و این نان بدون بروز کپک‌زدگی، بیش از ۱۶۸ ساعت نیز ماندگاری داشت. باید توجه داشت که کپک‌زدگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی است که ارزش آن می‌تواند به همه شاخص‌های کیفی دیگر ارجحیت داشته باشد، هرچند در استانداردها به آن اشاره‌ای نشده است. در صورتی که نان دچار کپک‌زدگی شود به‌طورکلی غیرقابل مصرف می‌گردد. بر این اساس نان A که با حرارت غیر-مستقیم تولید شده بود بهترین انتخاب برای اهداف نگهداری‌های طولانی مدت می‌باشد.

یکی دیگر از ویژگی‌هایی که در نان‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت یکنواختی پخت همه قسمت‌های نان بود. این در حالی است که در ماشین‌های پخت نان صنعتی با حرارت غیرمستقیم موجود در کشور مشکل اصلی سوختگی لبه‌های کناری نان به دلیل عدم متناسب‌بودن مبدل‌ها با فضای پخت و ابعاد نان و عدم طراحی صحیح آنها وجود دارد. میزان یکنواختی در نان A با حرارت غیرمستقیم و با مبدل توسعه داده شده بسیار عالی و قابل قبول بود و سوختگی لبه‌های نان مشاهده نشد.

به‌طورکلی می‌توان بیان نمود که استفاده از ابزار شبیه-سازی و طراحی و ساخت مبدل مناسب و نیز حرارت-دهی یکنواخت اعمال شده به بستر پخت موجب شده است که نان پخته شده با روش حرارت‌دهی غیرمستقیم دارای خواص کیفی بالا بوده و امکان نگهداری طولانی مدت نان فراهم شود. همچنین نان تهیه شده با این روش عاری از هر گونه ماده آلاینده مانند PAHs می‌باشد. هم-چنین برخورد علمی و استفاده از ابزار علمی مورد نیاز توانست مشکل محدود ماشین‌های موجود در صنعت نانوایی کشور را حل نیز حل کند.

غیرمستقیم (A) با شاخص کیفی کلی ۵/۰۹ از امتیاز بالاتری نسبت به نان پخته شده با حرارت مستقیم (B) با شاخص کیفی ۴/۵۴ برخوردار بود. این در حالی است که در محدود ماشین غیرمستقیم موجود در صنعت نانوایی کشور، کیفیت نان تولید در حد قابل قبول نبوده و سوختگی نقاط خاص نان و عدم یکنواختی پخت از معایب آن‌ها می‌باشد.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر روش پخت و زمان نگهداری

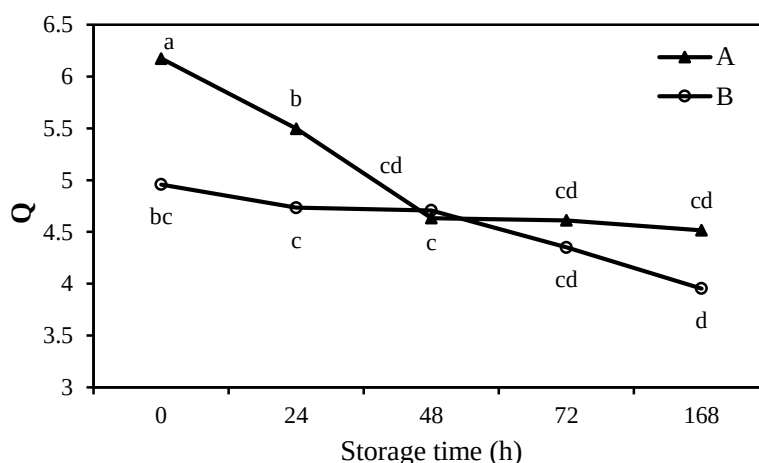
روی شاخص کیفی کلی نان

Table 5- ANOVA for parameter of bread baking method and bread storage durations on the overall quality index of the flatbreads

S.V.	df	MS
Baking method	1	8.945**
Storage durations	4	6.739**
Baking method × storage durations	4	1.445*
Error	110	0.603

** P < 0.01 and * P < 0.05

در شکل ۱۰ اثر متقابل روش پخت و مدت زمان نگهداری نان روی شاخص کلی کیفیت آن نشان داده شده است. نان پخته شده به روش حرارت‌دهی غیرمستقیم از نظر ارزیاب‌ها دارای کیفیت بالاتری نسبت به نان پخته شده توسط حرارت مستقیم بوده و این کیفیت بالا در طول زمان نگهداری به مدت ۱۶۸ ساعت نیز حفظ شده است. تفاوت کیفیت کلی دو نوع نان در مدت ۴۸ ساعت بعد از پخت، خیلی بیشتر از مقادیر کیفی آن دو در روزهای بعدی بود. یکی از دلایل برتری نان A در روزهای اول پخت، بو و عطر آن بود. بعد از ۴۸ ساعت نگهداری، تغییرات کیفیت هر دو محصول کندتر بوده است. نان B در روزهای اول پس از پخت، از افت کیفی زیادی برخوردار نبود، ولی بعد از ۴۸ ساعت، افت کیفیت با شیب تندتری صورت گرفته است که علت آن می‌تواند افزایش سختی نان، پس از ۴۸ ساعت نگهداری باشد. در



شکل ۱۰- تاثیر روش پخت و مدت زمان نگهداری روی شاخص کیفی نان: A: حرارت‌دهی غیرمستقیم و B: حرارت‌دهی مستقیم (حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد)

Figure 10- The effects of baking method and storage duration on bread quality index; A: Flatbread baked with indirect heat, and B: Flatbread baked with direct heat
(different letters indicate a significant difference at 5% probability level)

نتیجه‌گیری

موجود و غیریکنواختی پخت نان بود. نان مسطح در ماشین توسعه داده شده و نیز در ماشین متداول موجود در بازار هم پخته شده و ارزیابی‌های کیفی روی محصول صورت گرفت. طبق نتایج به دست آمده، نان پخته شده در سیستم حرارت غیرمستقیم دارای امتیاز کیفی بالا و عمر نگهداری بالاتری بود.

در این تحقیق ماشین پخت مناسب نان با حرارت غیر-مستقیم طراحی و ساخته شد. بدین منظور مبدل‌های حرارتی که مهم‌ترین بخش آن است شبیه‌سازی شده و بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مبدل مذکور ساخته و نصب شد. هدف اصلی از شبیه‌سازی و ساخت مبدل جدید فایده آمدن به غیریکنواختی توزیع حرارت در ماشین‌های

منابع مورد استفاده

- امین‌پور ا و شریعت‌زاده ن، ۱۳۹۲. ارزش غذایی نان، نشریه صنعت آرد و غذا، شماره ۶۹.
- بی‌نام، ۱۳۹۰، نان بدون دور ریز، آرزویی دست یافتنی، www.irna.ir
- بی‌نام، ۱۳۹۶، هزینه غذای ایرانیان در دهه اخیر، سایت اینترنتی www.khabaronline.ir
- پاشایی و و حق‌نظری س، ۱۳۹۸. اثر تخمیر و روش‌های پخت با مادون‌قرمز و سنتی بر کاهش میزان آفلاتوکسین نان لواش، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، (۳)، ۲۹-۵۲.
- رجب‌زاده ن، ۱۳۷۵. تکنولوژی نان، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- روانفر ن، محمدزاده میلانی ج و امیری ز، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر آرد مالت جو بر بیاتی نان بربری، فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، ۲، ۲۲-۱۵.

Al-Nasser M, Fayssal I and Moukalled F, 2020. Numerical Simulation of Bread Baking in a Convection Oven. *Applied Thermal Engineering* 184: 1-15.

Al-Rashdan A, Helaleh MI, Nisar A, Ibtisam A and Al-Ballam Z, 2010. Determination of the Levels of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Toasted Bread Using Gas Chromatography Mass Spectrometry. *International Journal of Analytical Chemistry* 20: 1-8.

- Anonymous, 2000. Approved Methods of American Association of Cereal Chemists. 10 th edition. Vol 11. AACC method 74-10.02, and 74-30.01. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minn, U.S.A.
- Eslamizad S, Yazdanpanah H, Javidnia K, Sadeghi R, Bayat M, Shahabipour S and Kobarfard F, 2016. Validation of an Analytical Method for Determination of Benzo[a]pyrene Bread using QuEChERS Method by GC-MS. Iranian Journal of Pharmaceutical Research 15: 465–474.
- Fasano E, Yebra-Pimentel I, Martínez-Carballo E and Simal-Gándara J, 2016. Profiling, distribution and levels of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in traditional smoked plant and animal foods. Food Control 59(1881): 581–590.
- Majdi HS, Alabdly HA, Hamad MF, Hasan BO and Hatha MM, 2019. Enhancement of Heat Transfer using Aluminum Oxide Nanofluid on Smooth and Finned Surfaces with COMSOL Multiphysics Simulation in Turbulent Flow. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences 22(1): 44-54.
- Meikandan M, Sundarraj M, Yogaraj D and Malarmohan K, 2018. Experimental and Numerical investigation on bare tube cross flow heat exchanger-Using COMSOL. International Journal of Ambient Energy 41(5): 500-510.
- Reddy RS, Arepally D and Datta AK, 2020. Estimation of heat flux in bread baking by Inverse problem. Journal of Food Engineering 271: 109774
- Rey-Salgueiro L, García-Falcón MS, Martínez-Carballo E and Simal-Gándara J, 2008. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. Food Chemistry 108(2): 607–615.
- Singh L and Agarwal T, 2018. Polycyclic aromatic hydrocarbons in diet: Concern for public health. Trends in Food Science and Technology 79: 160–170.
- Yoon S, Lee S, Go G and Park SK, 2014. An experimental and numerical approach to derive ground thermal conductivity in spiral coil type ground heat exchanger. Journal of the Energy Institute 88(3): 229-240.



Journal of Food Research, 2022,32(2):89-107
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>

OPEN ACCESS

© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)

DOI: 10.22034/FR.2022.47395.1800

Developing a rotary bread baking machine with an indirect heating system to increase the product quality using numerical techniques

F Bejaei¹, S Seyedlou^{2*}, H Nalbandi³ and HR Ghasemzadeh²

Received: July 29, 2021

Accepted: September 1, 2021

¹ PhD candidate. Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Assistant professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding author: Email: ss_seiedlo@yahoo.com

Introduction: In most countries, especially developing and underdeveloped countries, bread has high nutritional importance. Bread provides 40 to 45% of bioavailable carbohydrates, is an important source of proteins, and plays an important role in the digestive system (Aminpour and Shariatzadeh, 2013). The average per capita global consumption of bread is 60 to 70 kg. Large quantities of bread are wasted every year because different factors affect the number of waste products include flour quality, bread production technology, and the storage condition of the bread. Among the factors affecting the quality of the flatbread, technological factors including the source and method of heating the dough and the type of baking bed are very important. Those factors affect the quality and staleness of the bread and the amount of energy consumed per ton of the produced flatbread. All of these issues depend on how heat and mass are transferred. At present, for the baking of the flatbread, direct heat transfer of the burner (torch) to the dough is utilized in the Iranian bread industry. The use of the direct heat method in baking causes non-uniform heat distribution and non-uniform baking of the flatbread. Also, it causes the deposition of some chemical compounds such as benzopyrenes on the surface of the bread due to incomplete combustion of fuel and gases from the burning process of fossil fuels. At present, the change in the structure of bread production from traditional methods to industrial methods is one of the most important factors in the production of safe and standard bread while improving its quality. The objective of this study was to improve existing systems and developed the new flatbread industrial baking machine to increase product quality, product storability and reduce the bread contamination.

Material and methods: The design and construction of the oven were performed based on the existing machine in the bread industry. The final dimension of the bread baking machine was 250 × 250 cm, a height of 160 cm. Rotary bread baking machine with an indirect heating system was designed and heat exchangers of the machine were simulated. Simulation process was carried out in the COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 software environment. The geometric shapes of the heat exchangers were drawn in three dimensions and discretized using tetrahedral elements. The

momentum transfer equations solved numerically in the prevailing computing domain. Direct analyzer (UMFPACK) were used by the means of a PC unit with 16 GB of RAM. Turbulent isotropic diffusion and isotropic diffusion (Tuning parameter) were assumed as 0.25 and 0.5, respectively. The uniformity of airflow velocity inside the exchangers and the distribution of heat on the dough on the baking bed were investigated. After achieving the most effective design, the exchangers were constructed and installed inside the baking machine. A rotary baking bed was constrained with cast iron with a diameter of 220 cm and a thickness of 18 mm that was able to rotate horizontally. A three-phase electric motor with a speed of 1400 rpm and a power of 1.5 kW was used for the rotation system of the bed and carousel assembly. Two heat exchangers with an optimized shape were constructed with SS310 coupled with 2 burners. Bread baking experiments with the developed machine and the existing conventional machines were conducted to evaluate the sensory and staling characteristics of the produced flatbreads from different baking machines.

Results and discussion: The simulation results indicated that the air velocity in the center of the middle pipes of the upper exchanger with a standard deviation of 0.05 was in the range of 1.552 to 1.72 m/s, which means an acceptable uniformity. In the lower heat, there was a relatively uniform air distribution. The experimental validation of the developed simulator indicated that there is good agreement between the measured and predicted air velocity. In the top exchanger, R^2 and RMSE were 0.9 and 0.36, respectively and in the top exchanger, they were calculated to be 0.97 and 0.218, respectively. The results indicated that the sensory qualities of the bread produced with the indirect heating system in the present study as well as uniformity of baking and sensory acceptability were superior compared to the bread produced from the conventional industrial machines with direct heating systems (with a total sensory score of 5.09 vs. 4.54). Mold was also observed in a few breads, with direct heating samples, after 168 hours of storage. However, no significant changes were observed in the quality of the bread cooked by direct heating methods after 48 hours of storage, and this type of flatbread lasted more than 168 hours without mold. It should be noted that mold is one of the most important quality deterioration factors and its weight in the quality assessment of the bread is greater than the other quality evaluation factors even though it has not been included directly in the evaluation standards. If the bread becomes moldy, it will be unsafe for consumption and fully wasted. Accordingly, the flatbread produced by the indirect heat was the best choice for long-term storage purposes and the reduction of food waste. Another feature that was evaluated in the bread was the uniformity of baking of all parts of the flatbreads. One of the main problems with the industrial direct heat baking machines is the fact that the outer edges of the flatbread burn due to the inadequacy and somehow incompatibility of the exchangers with the baking space, the dimensions of the flatbread, and incorrect design of the heat exchangers. The flatbread baked with indirect heat and the newly designed exchangers was very uniform with no signs of burning in the outer edges of the bread.

Conclusion: In general, the results of the current study indicated that the use of the simulation tools, the design and manufacturing of the new exchangers and uniform indirect heating of the baking bed resulted in the production of higher quality bread which could be stored for a longer period of time while reducing the food waste. Also, bread prepared using the new machine was free of any contaminants such as PAHs.

Keywords: Conservation laws of momentum, Flatbread, Heating system, Industrial backing, Sensory evaluation, Simulation