ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(6):367-378

Experimental and Numerical Investigation of Effect of Ascending Step Heat Flux on Porosity and Brightness of Baked Bread

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Afkar H,[1] *MSc*,
Kianifar A,[1*] *PhD*
Zamani H,[2] *PhD*

How to cite this article
Afkar H, Kianifar A, Zamani H. Experimental and Numerical Investigation of Effect of Ascending Step Heat Flux on Porosity and Brightness of baked Bread. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(6): 367-378.

[1] Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science & Technology, Mashhad, Iran

****Correspondence***
Address: Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Phone: -
Fax: -
a-kiani@um.ac.ir

Article History
Received: September 28, 2020
Accepted: March 13, 2021
ePublished: May 01, 2021

ABSTRACT

Flatbreads have a small thickness and flat surface, unlike bulk bread, and there are only used in few countries such as Iran. Given the lack of research on this type of bread, the objective of this study was to numerically and experimentally investigate the porosity and surface brightness of flatbreads baked under different ascending step heat flux profiles. In order to investigate the effect of different heat flux profiles on the baking process of porous flatbread, the required bread was baked in a laboratory-scale device, and the equations of heat and mass transfer, porosity, and brightness were numerically modeled using the finite difference method in MATLAB. The results showed that there were suggestive of a good consistency between the experimental and numerical values. A total of 3 ascending step heat flux profiles with different time steps was experimentally and numerically investigated. The results also showed that the porosity of the bread baked under an ascending heat flux profile with 4 steps was more regular, and the average diameter and area of porosities obtained from the SEM imaging were higher in this profile compared to the other profiles. Moreover, based on the experimental and numerical results, the surface bright parameter (L*) was within the appropriate range for the bread baked under the ascending heat flux profile with 4 steps.

Keywords Heat and Mass Transfer, Porous Flat Bread, Ascending Step Heat Flux, Finite Difference, Lighting Bread

CITATION LINKS

[1] Crust density in bread baking: mathematical modelling and numerical solutions. [2] Proving of bread dough I: modelling the evolution of the bubble size distribution. [3] Use of a pressuremeter to measure the kinetics of carbon dioxide evolution in chemically leavened wheat flour dough. [4] Measurement of dough specific volume in chemically leavened dough systems. [5] Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. [6] Water transport in bread during baking. [7] Understanding crust formation during baking. [8] Bread baking–A review. [9] Predictive modelling of the bread-making performance and dough properties of wheat. [10] Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking. [11] A moving boundary problem in a food material undergoing volume change–simulation of bread baking. [12] A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking. [13] A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion. [14] Modelling of heat and mass transfer phenomena and quality changes during continuous biscuit baking using both deductive and inductive (neural network) modelling principles. [15] Porous media characterization of breads baked using novel heating modes. [16] Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. [17] A study of the bread-baking process. I: A phenomenological model. [18] Modelling heat and mass transfer in deformable porous media: Application to bread baking. [19] Handbook of microwave technology for food application. [20] A model for the oven rise of dough during baking. [21] Magnetic resonance imaging (MRI) of a cookie in comparison with time-lapse photographic analysis (TLPA) during baking process. [22] Two-dimensional CFD modeling and simulation of crustless bread baking process. [23] Energy optimization of bread baking process undergoing quality constraints. [24] Scanning electron microscopy (SEM) in food quality evaluation.

بررسی تأثیر شار حرارتی پله‌ای صعودی بر میزان تخلخل و روشنایی نان مسطح پخته‌شده به روش آزمایشگاهی و عددی

هادی افکار MSc
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
علی کیانی‌فر* PhD
دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
حسین زمانی PhD
دکتری، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

چکیده
نان مسطح(نان با ضخامت کم و سطح صاف) بر خلاف نان حجیم در کشورهای اندکی از جمله ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد و تحقیقات بسیار کمی درباره آن انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی عددی و آزمایشگاهی میزان تخلخل و روشنایی سطح در نان مسطح پخته‌شده با پروفیل‌های مختلف شار حرارتی پله‌ای صعودی می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی اثر پروفیل‌های مختلف شار حرارتی در فرایند پخت نان مسطح متخلخل، نان‌های مورد نیاز با استفاده از دستگاه ساخته‌شده در مقیاس آزمایشگاهی پخته‌شده و معادلات انتقال گرما، جرم، تخلخل و روشنایی به صورت عددی با استفاده از روش تفاضل محدود در نرم‌افزار مطلب مدل‌سازی شده‌اند. نتایج نشان داد که مقادیر آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی با گام‌های زمانی مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان دادند که وضعیت تخلخل نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی با چهار پله، منظم‌تر و میانگین مقادیر قطر و مساحت منافذ در تصاویر حاصل از عکس میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) نسبت به پروفیل‌های مورد بررسی دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج تجربی و عددی مشاهده شد پارامتر مربوط به روشنایی سطح نان برای نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی با چهار پله در محدوده مناسب می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: انتقال گرما و جرم، نان مسطح متخلخل، شار حرارتی صعودی پله‌ای ، تفاضل محدود، روشنایی نان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵
*نویسنده مسئول: a-kiani@um.ac.ir

۱- مقدمه

مکانیزم پخت نان فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد که در آن زنجیره‌ای از تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی در محصول مانند تغییر حجم، تبخیر آب، تشکیل یک ساختار متخلخل، تغییر ماهیت پروتئین‌ها، ژلاتینه شدن نشاسته، تشکیل پوسته و واکنش‌های مربوط به تغییر رنگ اتفاق می‌افتد[1]. اولین پدیده‌ای که در طول فرایند پخت رخ می‌دهد تشکیل حباب‌های دی اکسید کربن است[2]. در ابتدا بدون انتقال گاز حباب‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند. تخمیر، دی اکسید کربن را آزاد می‌کند که باعث افزایش تخلخل و در نهایت باعث افزایش فشار می‌شود[3, 4]. خواص رئولوژی تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر شکل دارند و ژلاتینه شدن در حدود دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد یعنی هنگامی که خمیر به مغز نان تبدیل می‌شود رخ می‌دهد[5]. تغییر شکل هنگامی که ساختار جامد پوسته نان شروع به شکل‌گیری می‌کند متوقف می‌شود. آخرین پدیده‌ای که در طول پخت نان رخ می‌دهد برشته شدن نان می‌باشد[6].

نان در طول پخت در معرض گرمای رسانشی، جابجایی طبیعی و تابشی قرار دارد. در تحقیقاتی که در دنیا در زمینه پخت تماسی نان صورت گرفته است، یک مدل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود یا روش المان محدود بسط داده شده است. این مدل، پیش‌بینی چرخش دما، محتوای آب، فشار و تغییر شکل گاز را منظور می‌کند. روند پخت نان به صورت یک محیط متخلخل می‌باشد. یک محیط متخلخل، از یک ماتریس جامد با فضای خالی پر شده توسط سیالات به وجود آمده است[7]. آرپیتا موندال و همکارش انتقال همزمان جرم و حرارت درون خمیر نان در فری که به منظور پخت نان بدون پوسته ساخته شده بود، مدل‌سازی نمودند. در این مدل‌سازی مشاهده نمودند، دمای مغز نان در انتهای پخت در میزان ثابت ۹۵ درجه سانتی‌گراد باقی‌مانده و مقدار رطوبت مطلوب برای کیفیت مناسب نان نیز بدست آمد[8]. اندرسون و همکارانش مزیت انتقال حرارت تابشی نسبت به روش‌های دیگر را زمان پخت کوتاه و افت رطوبت کمتر بیان کردند[9]. آن‌ها در مقاله‌ای دیگر بیان کردند که انتقال حرارت تابشی منجر به تولید محصول با ضخامت پوسته کمتر و ساختار نرم‌تر می‌شود که ماندگاری محصول از لحاظ قابلیت مصرف را افزایش می‌دهد[10]. پیور لیس و سالوادری در سال ۲۰۰۹، پخت نان را یک مسئله مرز متحرک در نظر گرفتند که در آن پدیده تبخیر -میعان به عنوان عامل انتقال حرارت سریع در تعریف ضریب انتقال حرارت هدایتی موثر لحاظ شده است[11]. وریس و همکاران یک روش اختلاف محدود یک بعدی، جهت مدل‌سازی پخش گرما در خمیر به کار گرفتند و انتقال آب را صرفا با مکانیزم تبخیر آب در ناحیه گرم‌تر خارجی و میعان بخار در ناحیه سردتر داخلی مدل کردند[12]. ترولدسون و جانستاد، مدلی بر مبنای نظریه تبخیر میعان ارائه کردند که در آن سه معادله دیفرانسیل جزئی انتقال گرما(بر اساس قانون فوریه)، انتقال آب (قانون فیک) و انتقال بخار (قانون فیک) و با فرض حالت اشباع بخار و رفتار گاز ایده آل(معادله گاز ایده آل جهت ایجاد ارتباط بین معادلات) به طور همزمان مورد حل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که محتوای رطوبت در مرکز نان ابتدا به

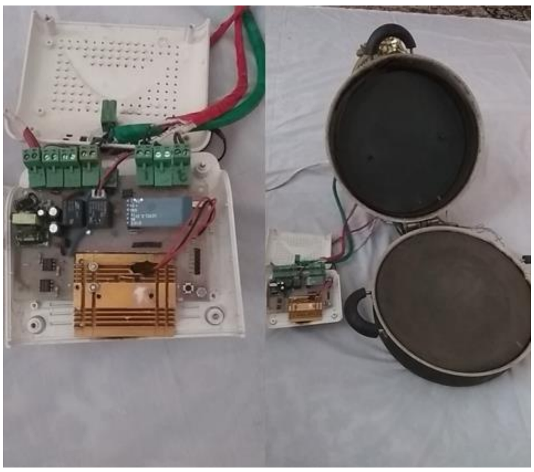
تدریج زیاد می‌شود و دمای مرکز تقریباً با این افزایش ثابت می‌ماند و در انتها با آغاز فرآیند خشک شدن هسته نان، دما افزایش می‌یابد[13]. بروپارت و همکارش، یک مدل ریاضی حالت پایدار برای مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم طی فرایند پخت نوعی بیسکویت، در یک فر پیوسته با مشعل غیرمستقیم گازی ایجاد کردند. انتقال حرارت از طریق هدایت، جابجایی، تشعشع و تغییر فاز مدل گردید. در انتقال جرم نیز چگالش بخار آب هوای فر در سطح محصول و نیز خشک شدن محصول در نظر گرفته شد[14]. اشیم و داتا نیز انتقال حرارت و جرم را به همراه انبساط حجمی در حین پخت برای خمیر نان مدل کرده و توزیع دما، فشار و رطوبت را بدست آوردند[15]. اربن والبی و همکاران، مطالعه تجربی با هدف بررسی تأثیر جابجایی اجباری مستقیم (جت های جریان برخوردی) بر روی کیفیت مواد غذایی انجام دادند. آن‌ها دو ماده غذایی، نان و کتلت گوشت انتخاب کردند. نتایج، زمان بسیار کمتر برای پخت و رنگ یکنواخت محصول را در مورد گوشت نشان داد و در مورد نان نسبت به کوره‌های سنتی، رنگ نهایی کمی یکنواخت تر شده بود اما تغییر زیادی در زمان پخت مشاهده نشد[16]. زانونی و همکاران طی آزمایش‌ها تجربی، میزان رطوبت و دمای نقاط داخلی نان را در حین پخت و برای نمونه‌های مختلف با تخلخل متفاوت در بازه دمایی ۱۵۰ - ۳۵۰°C اندازه گرفتند. آزمایش‌های تجربی نشان دادند که در انتهای فرایند پخت، دما در مرکز نان به ۱۰۰°C نزدیک می‌شود و دمای سطح به دمای فر می‌رسد[17]. نیکلاس و همکاران نیز انتقال حرارت و جرم را به همراه انبساط حجمی در حین پخت برای خمیر نان مدل کرده و توزیع دما، فشار و رطوبت را برای میزان انرژی‌های مختلف فر در طی زمان و دمای مشخص فر به دست آوردند[18]. پخت نان مینیاتوری به عنوان یک روش آزمایشگاهی اقتصادی برای مطالعه فرایند پخت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پخت نان مینیاتوری اساساً مشابه فرایند پخت نان معمولی باکیفیت مشابه است[19]. پارامترهای کیفیت شامل خواصی مانند شکل‌گیری مغز، ضخامت پوسته، رنگ و میزان رطوبت پوسته نان می‌باشد که در طی فرایند پخت در مقیاس زمانی متفاوت مشابه نان معمولی عمل می‌کند[20]. پس از شکل‌گیری اولیه پوسته، تفاوت درخشندگی و رنگ کلی با ضخامت پوسته رابطه خطی دارد[21].

تا کنون پژوهش‌های فراوانی درباره نان حجیم پخته‌شده با شار حرارتی ثابت انجام شده است. اما هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پروفیل‌های شار حرارتی پله‌ای صعودی مختلف بر میزان تخلخل و روشنایی سطح نان مسطح پخته‌شده به روش عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. میزان تخلخل و روشنایی نان دو پارامتر مهم مربوط به کیفیت نان پخته‌شده می‌باشند. میزان تخلخل تأثیر بسزایی در نرمی، سفتی، قابلیت جویدن و میزان رضایت مصرف‌کننده از نان دارد. برشتگی، سوختگی و یا خام بودن مربوط به میزان روشنایی نان است. روشنایی مناسب نان نه تنها باعث طعم و بوی مطلوب بلکه باعث افزایش علاقه به مصرف نان تهیه‌شده می‌شود. فرایند پخت نان مرحله‌ای است که در آن محصول، ویژگی‌های نهایی خود را پیداکرده و خمیر تبدیل به فراورده‌ای با حالت اسفنجی، مطبوع و خوشمزه می‌شود. کیفیت نان تا حد زیادی وابسته به مرحله پخت است. استانداردترین روش پخت روشی است که در آن نان باکیفیت در کمترین زمان ممکن و با کمترین انرژی مصرفی پخته شود. نوآوری این پژوهش بررسی فرایند جدید پخت نان باکیفیت نسبت به نان‌های پخته‌شده با روش معمول می‌باشد که می‌تواند زمینه‌ساز و بستر تحقیقات علمی در زمینه پخت نان مسطح شامل زمان پخت و انرژی مصرفی در آینده شود.

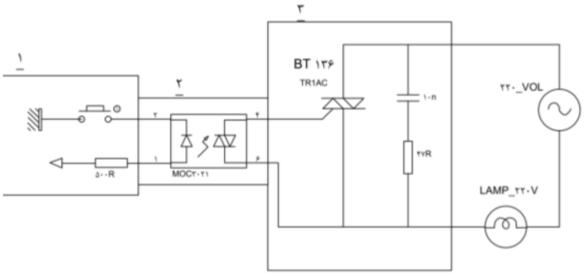
۲- شرح دستگاه

در اين تحقيق براي داشتن روشي استاندارد جهت آزمايش نان‌هاي پخته‌شده با پروفیل‌های مختلف شار حرارتی در تنور، از يك دستگاه تنور آزمايشگاهي مجهز به سنسورهايي براي اندازه‌گيري درجه حرارت نقاط مختلف نان با محفظه پختي به قطر ۳۰ سانتی-متر و از جنس چدن استفاده می‌شود. قابل به ذکر است که تنور آزمايشگاهي با الگو گیری از تنورهاي مدرن پخت نان طراحي و ساخته شده است. این دستگاه با استفاده از انرژی الکتریکی کار می‌کند. در بالا و پایین بستر پخت نان، از دو المنت با حداکثر توان ۱۵۰۰ وات استفاده شده است و فاصله المنت‌ها تا بستر پخت ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. پروفیل شار حرارتی به وسیله یک نرم‌افزار نصب‌شده بر روی کامپیوتر به تنور و المنت‌ها اعمال می‌شود به گونه‌ای که نرخ حرارت دهی را متناسب با زمان پخت کنترل و تغییر می‌دهد. در شکل ۱ تنور مورد استفاده و سیستم کنترلی آن نشان داده شده است.

در شکل ۲ نیز شماتیکی از سیستم کنترلی دستگاه رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مدار از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول که بخش فرمان می‌باشد در شماتیک با شاسی کلید نشان داده شده است. در عمل فرمان از طریق میکروکنترلر



شکل ۱) تنور آزمایشگاهی ساخته‌شده و سیستم کنترلی آن



شکل ۲) شماتیک سیستم کنترلی تنور آزمایشگاهی

ارسال می‌شود که یک فرمان صفر و یک می‌باشد. قسمت دوم نقش انتقال فرمان از بخش الکترونیکی به بخش قدرت یعنی بخش سوم را دارد. در قسمت دوم از یک آی سی استفاده‌شده که وظیفه این ای سی، کنترل قدرت اعمالی به المنت است. برای اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف نان (دمای محفظه پخت، دمای بستر پخت و دمای مرکز نان) از سه عدد سنسور ترموکوپل استفاده شده است. کلیه دماهای اندازه‌گیری شده با ترموکوپل‌ها به وسیله نمایشگر نشان داده می‌شوند. دقت اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها ۰/۷۵ درصد می‌باشد. همچنین ترموکوپل‌ها از نوع K و به وسیله کالیبراتور دما مدل TC-920 کالیبره می‌باشند.

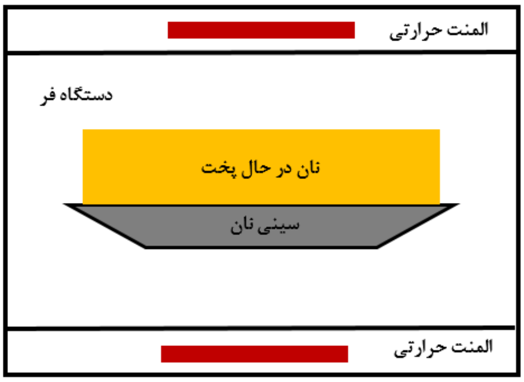
۳- شرح آزمایش

مواد اصلی تشکیل‌دهنده خمیر شامل آرد، آب، مخمر خشک و نمک می‌باشند که هر کدام ویژگی‌ها و استانداردهای مختلفی در زمان تولید و نگهداری دارند. به منظور تهیه خمیر استاندارد، مناسب و یکنواخت، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده خمیر ابتدا به مدت ۸ دقیقه و پس از ۵ دقیقه استراحت، مجدداً به مدت ۲ تا ۳ دقیقه ورز داده می‌شود تا خمیر تهیه گردد. خمیر حاصل به مدت ٤٠ دقیقه جهت تخمیر استراحت داده‌شده و پس از این مدت خمیر زیر و رو می‌شود. پس از گذشت ۳ تا ۵ دقیقه چانه‌های خمیر به وزن متوسط ۳۵۰ گرم جدا می‌گردند که از این ۳۵۰ گرم حدود ٤٠ درصد وزن آن آب می‌باشد. کلیه چانه‌های خمیر آماده شده به صورت نمونه‌هایی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر در داخل دستگاه ساخته‌شده قرار داده می‌شوند.

۴- مدل‌سازی عددی

شماتیک نان در داخل تنور در شکل ۳ مشاهده می‌شود. دو المنت حرارتی در بالا و پایین نان حرارت لازم برای پخت آن را فراهم می‌کنند. مدل‌سازی بصورت دو بعدی و با استفاده از روش تفاضل محدود و گذرا (ضمنی) انجام می‌شود.

برای مدل‌سازی ریاضی انتقال همزمان گرما و جرم درون نان در هنگام پخت، سه معادله مشتق جزئی انتقال حرارت، انتقال جرم برای آب و بخار بصورت همزمان حل می‌شوند[13]. به دلیل مدل‌سازی نان مسطح، مطابق مرجع[22] مدل‌سازی به صورت دو بعدی انجام گردیده و از تغییر حجم خمیر در طی فرایند پخت



شکل ۳) نمایی از شماتیک نان در حال پخت و دستگاه مختصات

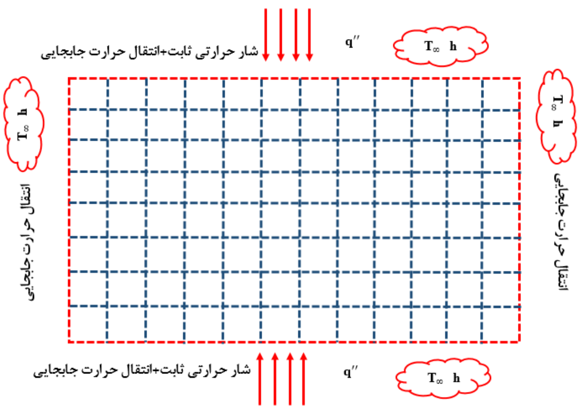
صرفنظر شده است. در این پژوهش به بررسی تغییرات دمایی در مرکز سطح نان، مرکز مغز نان و مرکز بستر نان پرداخته می‌شود. به همین دلیل مطابق شکل ٤ میدان حل، مقطع نان در راستای ضخامت نان و مستطیلی به عرض ۱ سانتی‌متر (ارتفاع نان) و طول ۳۰ سانتی‌متر (قطر نان) انتخاب می‌شود. با توجه به شکل ٤ و میدان حل انتخاب‌شده برای مدل‌سازی عددی از مختصات کارتزین استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی انجام‌شده، شار حرارتی متغیر(q'') در هر گام زمانی مطابق با معادله ٤ و ٥ به شرایط مرزی اعمال گردیده است که ایده نو و جدیدی برای مدل‌سازی عددی پخت نان با شار حرارتی متغیر می‌باشد.

۴-۱- معادله انتقال گرما

معادله انتقال گرما از روی بالانس انرژی بر روی یک المان مورد نظر از نان، بصورت دو بعدی و با توجه به دستگاه مختصات نشان داده‌شده در شکل ۳ و ٤ بصورت زیر می‌باشد. از ترم جابه‌جایی در معادله انتقال حرارت صرف‌نظر شده است و تنها انتقال حرارت ناشی از هدایت و گرمای نهان تبخیر ناشی از تغییر فاز فرض گردیده است[13].

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial W}{\partial t} \qquad (1)$$

$$0<x<L \qquad 0<y<H$$



شکل ۴) نمایی از شبکه‌بندی و شرایط مرزی هندسه

۴-۱-۱- شرایط مرزی انتقال گرما

شامل چهار شرط مرزی در راستای x و y و یک شرط اولیه است. در مرز بین سطح بالا و پایین نان شار حرارتی متغیر در هر گام زمانی اعمال شده است[13].

$$+k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = h(T_{air} - T_w) - \lambda\rho D_w \frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=0} \quad (۲)$$

$$+k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=l} = h(T_{air} - T_w) - \lambda\rho D_w \frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=L} \quad (۳)$$

$$+k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0} = h(T_{air} - T_w) - \lambda\rho D_w \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=0} + q'' \quad (٤)$$

$$+k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=L} = h(T_{air} - T_w) - \lambda\rho D_w \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=H} + q'' \quad (۵)$$

$$T(x,y,0) = T_0(x,y) \quad (٦)$$

انتقال جرم به دو صورت آب و بخار طبق قانون فیک بصورت زیر می‌باشد. از ترم جابجایی در معادله انتقال جرم صرف‌نظر شده و انتقال جرم تنها ناشی از نفوذ فرض شده است[13].

۴-۲- معادله انتقال رطوبت در فاز بخار

$$\frac{\partial V}{\partial t} = D_v\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) \quad (۷)$$

۴-۲-۱- شرایط مرزی معادله انتقال رطوبت در فاز بخار

$$\frac{\partial V}{\partial x}\Big|_{x=0} = h_v(V(0,y,t) - V_{air}) \quad (۸)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}\Big|_{x=L} = h_v(V(l,y,t) - V_{air}) \quad (۹)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y}\Big|_{y=0} = h_v(V(x,0,t) - V_{air}) \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y}\Big|_{y=H} = h_v(V(x,L,t) - V_{air}) \quad (۱۱)$$

$$V(x,y,0) = V_0(x,y) \quad (۱۲)$$

۴-۳- معادله انتقال رطوبت در فاز مایع

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_w\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right) \quad (۱۳)$$

۴-۳-۱- شرایط مرزی معادله انتقال رطوبت در فاز مایع

$$\frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=0} = h_w(W(0,y,t) - W_{air}) \quad (١٤)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=L} = h_w(W(l,y,t) - W_{air}) \quad (۱۵)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=0} = h_w(W(x,0,t) - W_{air}) \quad (١٦)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=H} = h_w(W(x,L,t) - W_{air}) \quad (۱۷)$$

$$W(x,y,0) = W_0(x,y) \quad (۱۸)$$

۴-۴-تخلخل

در این پژوهش نان به صورت یک محیط متخلخل یکنواخت در نظر گرفته شده است. تخلخل به صورت مجموع نسبت حجم بخار آب و هوای موجود در خمیر به حجم کل مطابق با معادله ۲۱ در نظر گرفته می‌شود. در محیط متخلخل نان، پارامترهای موثر برای مخلوط بخار آب و هوا از رابطه زیر تعیین می‌گردند[18].

$$C_{eq} = \frac{\sum \theta_i \rho_i c_{p_i}}{\sum \rho_i \theta_i} \quad (۱۹)$$

$$k_{eq} = \frac{\sum \theta_i k_i}{\sum \theta_i} \quad (۲۰)$$

$$\theta = \sum \theta_i \quad (۲۱)$$

در معادله مربوط به انتقال گرما، معادلات ۱۹ و ۲۰ با مقداردهی اولیه برای نسبت حجمی بخار و هوا قرار داده می‌شوند.

۴-۵- روشنایی سطح نان

روشنایی نان به وسیله معادله ۲۲ مدل‌سازی می‌شود[23]:

$$\frac{dL}{dt} = -k_{light}(L)$$

$$-k_{light} = k_{light.0}\exp\left(-\frac{A}{T}\right) \quad (۲۲)$$

$$k_{light.0} = 7.9233 \times 10^6 + 2.7397 \times 10^6/D_w$$

$$A = 9.13657 \times 10^3 + 49.4738/D_w$$

مقادیر مربوط به تخلخل و روشنایی نان در برنامه محاسباتی مطابق دما، رطوبت و بخار آب به دست آمده در هر گام زمانی به دست می‌آیند.

۴-۶- پارامترهای فیزیکی

با توجه به اینکه خمیر نان متشکل از چند ماده می‌باشد و با گذشت زمان دما افزایش می‌یابد، پارامترهای مورد نیاز برای حل معادلات مطابق روابط زیر می‌باشند[13]:

گرمای ویژه:

$$C_p = \frac{(2847 - 2031)t}{24 \times 60} + 2031 \quad (۲۳)$$

چگالی:

$$\rho = 251 - \frac{(251 - 220)t}{24 \times 60} \quad (٢٤)$$

ضریب نفوذ رطوبت:

$$\text{constant}D_w = 1.35 \times 10^{-10} \quad (۲۵)$$

ضریب نفوذ بخار:

$$D_v = 9 \times 10^{-12}T^2 \quad (٢٦)$$

ضریب انتقال جرم بخار:

$$h_v = \frac{3 \cdot 2 \times 10^9}{T^3} \quad (۲۷)$$

ضریب انتقال جرم رطوبت:

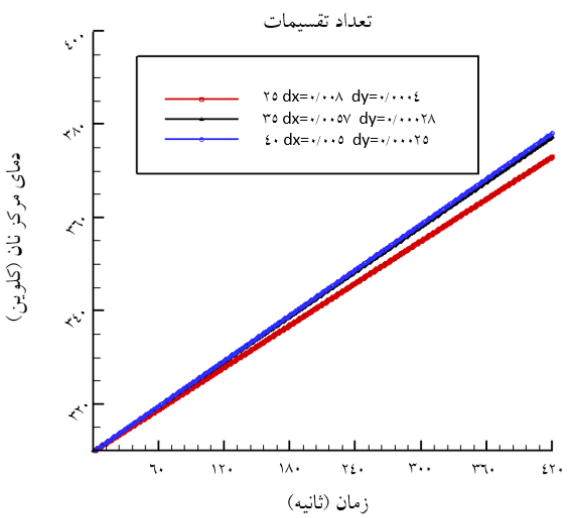
$$h_w = 1 \cdot 4 \times 10^{-3}T + 0 \cdot 27w - 4 \times 10^{-4}T \times w - 0 \cdot 77w^2 \quad (۲۸)$$

گرمای نهان تبخیر آب:

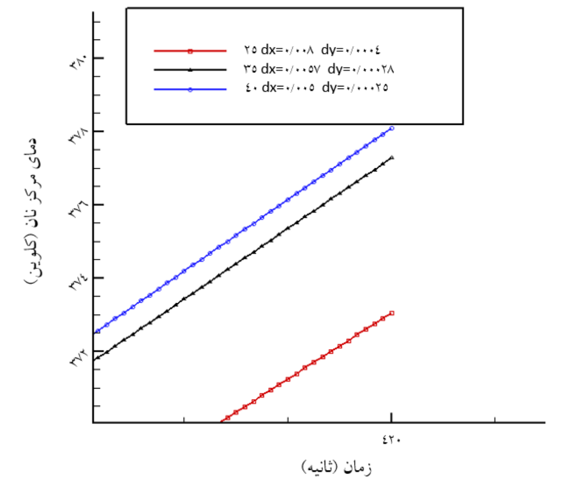
$$\lambda = 2 \cdot 3339 \times 10^6 \text{ constant} \quad (۲۹)$$

۵-استقلال شبکه

همان طور که گفته شد در کار حاضر از روش ضمنی استفاده شده است. با توجه به اینکه در این روش هیچ شرطی برای گام زمانی و برای پایدار شدن و همگرا شدن جواب وجود ندارد بنابراین گام زمانی بی بعد $\Delta t=1$ در نظر گرفته شده است. برای بررسی استقلال مدل‌سازی، از سه نوع شبکه‌بندی مختلف استفاده‌شده و نتایج مربوط به این سه شبکه باهم مقایسه می‌شوند. استقلال شبکه برای توان حرارتی ثابت ۱۲۰۰ وات انجام می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵) (الف) بررسی استقلال شبکه برای سه نوع شبکه‌بندی (ب) بزرگنمایی نمودار شکل الف

شکل ٥ چگونگی افزایش دما در مرکز نان را برای سه شبکه‌بندی مختلف نشان می‌دهد. متوسط درصد تفاوت بین نتایج دو شبکه‌بندی آخر برابر ۱/٤ درصد است که این مقدار کم نشان‌دهنده استقلال مدل‌سازی از شبکه‌بندی است. برای ادامه نتایج از شبکه‌بندی دوم استفاده می‌شود زیرا تفاوت زمان دیتاگیری با شبکه‌بندی آخر در حدود نیم ساعت می‌باشد.

۶- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

تا کنون تحقیقات بسیار کمی درباره پخت نان مسطح صورت گرفته است. همچنین در این پژوهش برخلاف کارهای تحقیقاتی گذشته، شار حرارتی و یا انرژی لازم برای پخت نان ثابت نمی‌باشد و با گذشت زمان در طول فرایند پخت تغییر می‌کند. در ادامه مشخص خواهد گردید شار حرارتی متغیر می‌تواند تأثیر بسزایی در کیفیت نان پخته‌شده داشته باشد. نان پخته‌شده با چهار گام زمانی به دلیل حرارت یکنواخت تر نسبت به بقیه پروفیل‌های شار حرارتی مورد بحث تخلخل و روشنایی مناسب‌تری دارد. به منظور بررسی صحت نتایج حل عددی، به مقایسه نتایج مدل تفاضل محدود با نتایج آزمایشگاهی با دو تکرار مختلف پرداخته می‌شود. پروفیل-های شار حرارتی مورد نظر به شرح ذیل می‌باشند. پروفیل شار حرارتی اعمالی به دو المنت بالا و پایین دستگاه آزمایشی ساخته‌شده یکسان می‌باشد.

نمونه ۱: پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی با ٤ گام زمانی

نمونه ۲: پروفیل شار حرارتی صعودی با ۳ گام زمانی

نمونه ۳: پروفیل شار حرارتی صعودی با ۲ گام زمانی

در شکل ٦ تغییرات دمای مرکز نان برای نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی معرفی‌شده نشان داده‌شده و نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل عددی مقایسه شده است. مشاهده می-شود نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در کلیه پروفیل‌های حرارتی تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند. با توجه به متغیر بودن شار حرارتی در طول فرایند پخت، زمان پخت نسبت به شار حرارتی ثابت بیشتر می‌باشد. در پخت نان با شار حرارتی ثابت، دمای تنور در طول فرایند پخت در ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ثابت و زمان پخت ۳ دقیقه می‌باشد درحالی‌که در این پژوهش به دلیل شار حرارتی متغیر، دما در طول فرایند پخت ثابت نمی‌باشد. در جدول ۱ نیز درصد میانگین خطا میان نتایج تجربی و عددی برای میدان دما برای این سه پروفیل شار حرارتی نشان داده شده است.

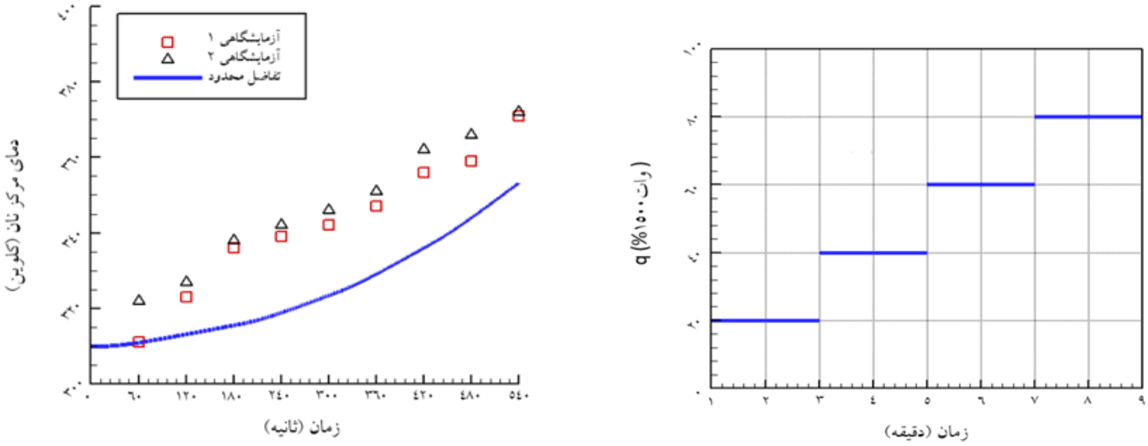
جدول ۱) میانگین خطا بین نتایج تجربی و نتایج عددی برای میدان دما

شماره پروفیل	میانگین درصد خطا (%)
نمونه ۱	۸/۶۸
نمونه ۲	۸/۵۲
نمونه ۳	۸/۱۳

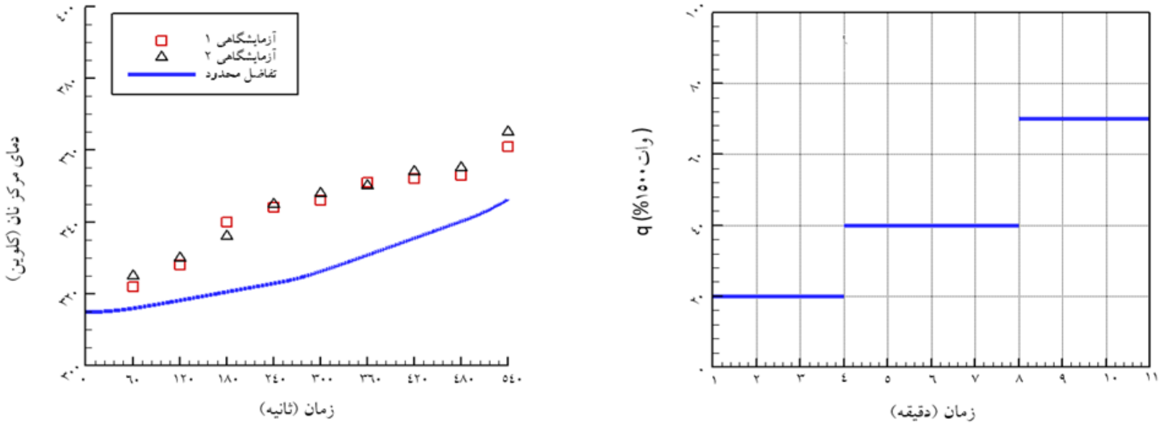
۷-نتایج

۷-۱- بررسی نمودارهای مربوط به دما

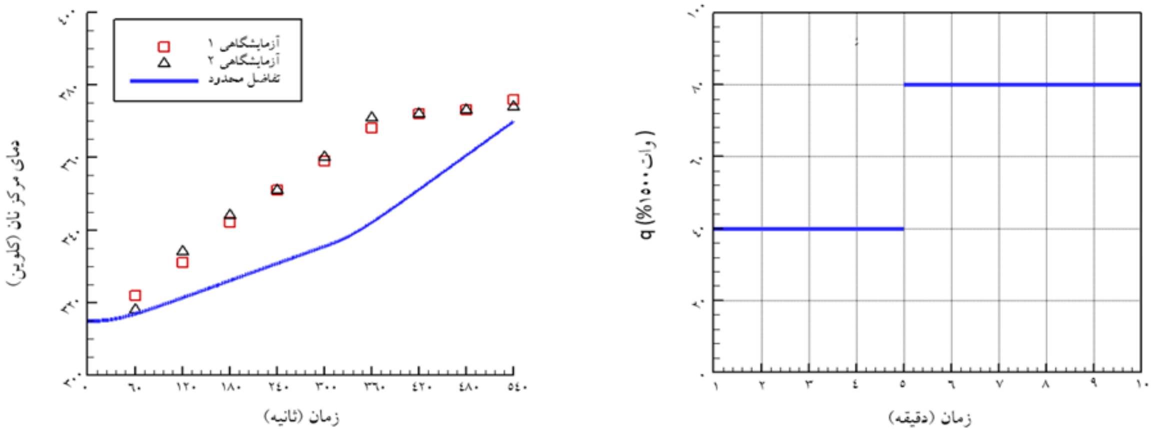
چگونگی افزایش دمای سه نقطه مختلف نان(مرکز سطح نان، مرکز مغز نان و مرکز بستر نان) در طی فرایند پخت، برای نان پخته‌شده با پروفیل‌های شار حرارتی صعودی پله‌ای مختلف به کمک حل عددی در شکل ۷ نشان داده شده است. دمای نقاط مختلف نان با گذشت زمان در طول فرایند پخت افزایش می‌یابد ولی دمای مرکز به دلیل وجود رطوبت در مرکز نان، از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر نمی‌رود. همچنین مشاهده می‌شود در هنگام تغییر شار حرارتی، در پروفیل‌های دمایی پله و شکستگی ایجاد می‌شود. در پروفیل حرارتی با چهار پله به دلیل تغییر شار حرارتی ملایم، تغییرات دمایی هم با شیب کمتر اتفاق می‌افتد.



(الف)



(ب)



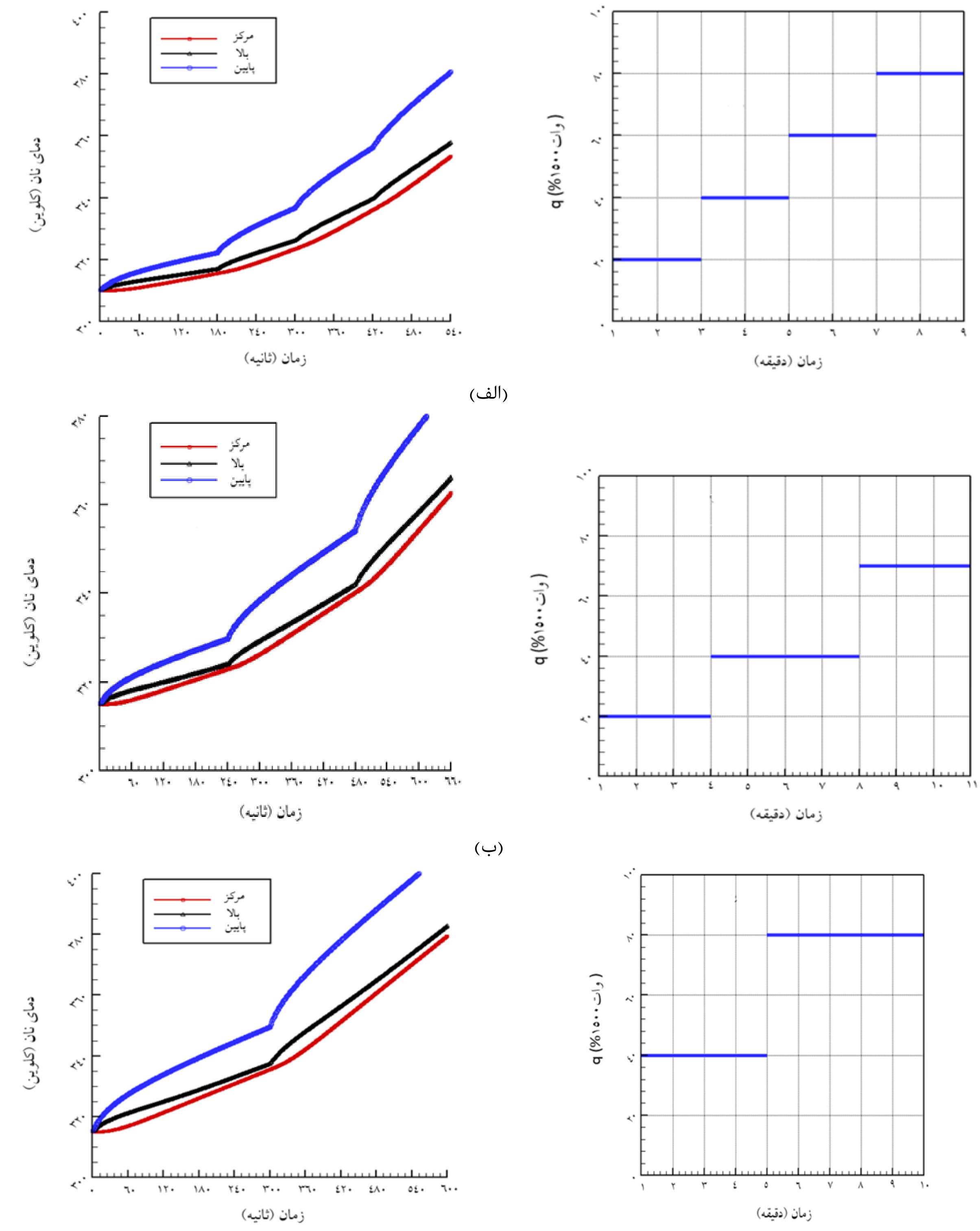
(ج)

شکل ۶) مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تغییرات دمای مرکز نان، برای نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی مختلف، الف) تغییرات دمای مرکز نان پخته شده با پروفیل شار حرارتی پله ای صعودی با سه گام زمانی ب) تغییرات دمای مرکز نان پخته شده با پروفیل شار حرارتی پله ای صعودی با چهار گام زمانی ج) تغییرات دمای مرکز نان پخته شده با پروفیل شار حرارتی پله ای صعودی با دو گام زمانی

۷-۲- تخلخل

۷-۲-۱- نتایج مدل‌سازی عددی میزان تخلخل

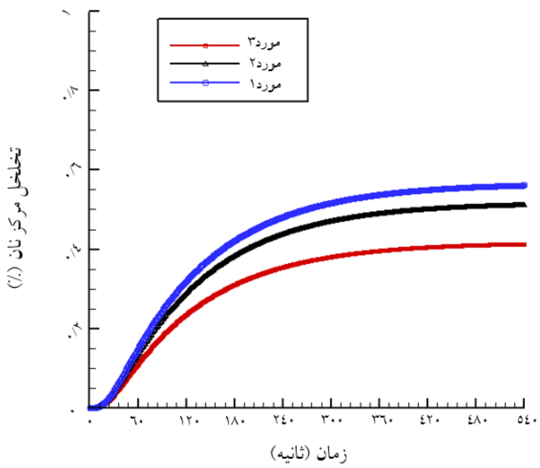
تخلخل همه فضاهای خالی در جسم می‌باشد که به صورت درصدی از حجم جسم بیان می‌شود. در شکل ۸ میزان تخلخل مرکز نان‌های در حال پخت، برای ۳ پروفیل شار حرارتی پله‌ای به کمک حل عددی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان میزان تخلخل برای هر سه پروفیل افزایش یافته است اما نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی با چهار گام زمانی به دلیل حرارت یکنواخت در طول فرایند پخت میزان تخلخل بیشتری دارد. در این پژوهش به دلیل اینکه به بررسی نان مسطح پرداخته شده است میزان تخلخل نان‌های مورد آزمایش نسبت به نان‌های حجیم کمتر می‌باشد.



شکل ۷) چگونگی تغییرات دما برای نان‌های پخته‌شده با شارهای حرارتی متفاوت در سه نقطه مختلف نان به کمک حل عددی

۷-۲-۲- نتایج تجربی میزان تخلخل نان

در بررسی تجربی میزان تخلخل مغز نان‌های پخته‌شده با پروفیل-های شار حرارتی پله‌ای صعودی، از تکنیک پردازش تصویر استفاده شده است. بدین منظور برشی به ابعاد ۸ در ۱ سانتی‌متر از مغز نان تهیه و به وسیله دوربین عکاسی تصویربرداری می‌شود. تصویر تهیه‌شده در اختیار نرم‌افزار Image J قرار می‌گیرد. با فعال کردن قسمت ۸ بیت، تصاویر سطح خاکستري و سفید ایجاد می‌شود. این تصاویر، مجموعه‌اي از نقاط روشن و تاریک است که محاسبه نسبت نقاط روشن به تاریک به عنوان شاخصی از میزان تخلخل نمونه‌ها بر آورد می‌شود. هر چه این نسبت بیشتر باشد میزان



شکل ۸) مقایسه میزان تخلخل مرکز نان پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی به کمک حل عددی

حفرات موجود در بافت نان(میزان تخلخل) بیشتر است. با فعال کردن قسمت تحلیل نرم‌افزار، این نسبت محاسبه و میزان تخلخل نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

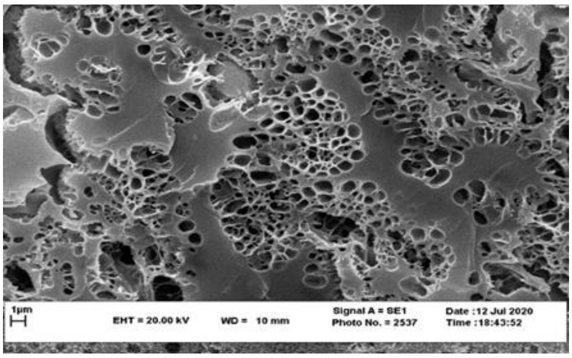
نتایج مربوط به ارزیابی حجم و میزان تخلخل مغز نان در جدول ۲ ارائه گردیده است. پس از مقایسه نان‌های پخته‌شده مشخص گردید که نان پخته‌شده با شار حرارتی صعودی پله‌ای با چهار گام زمانی نسبت به سایر نمونه‌ها از حجم و تخلخل بیشتری برخوردار است. به علت شار حرارتی بالا در انتهای فرایند پخت و بیش از حد خشک شدن نان‌ها در طول فرایند پخت، پروفیل‌های شار حرارتی با سه و دو گام زمانی میزان تخلخل کمتری دارند.

۷-۲-۳- عکس SEM

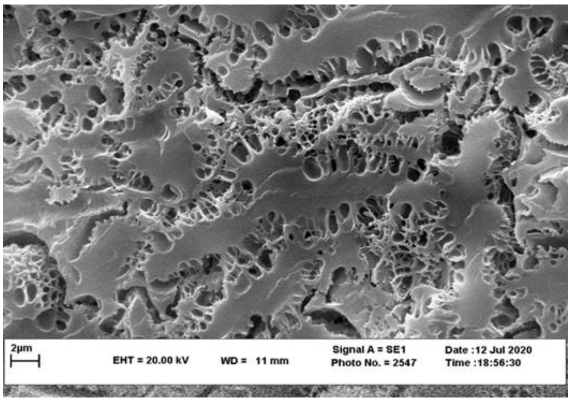
به منظور مشاهده چگونگی قرارگیری خلل و فرج موجود در نان-های پخته‌شده با پروفیل‌های مختلف شار حرارتی از عکس SEM استفاده می‌شود[24]. در شکل ۹ وضعیت خلل و فرج و میزان تخلخل نان‌های پخته‌شده با پروفیل‌های شار حرارتی صعودی پله-ای مختلف به کمک عکس SEM نشان داده شده است. با توجه به عکس گرفته‌شده از نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی با چهار پله مشاهده می‌شود حفرات موجود در این نان منظم‌تر می‌باشند. همچنین میانگین مقادیر قطر و مساحت منافذ تصاویر حاصل از عکس SEM که توسط نرم‌افزار Microstructure

جدول ۲) مقایسه میزان تخلخل نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای به روش تجربی و عددی

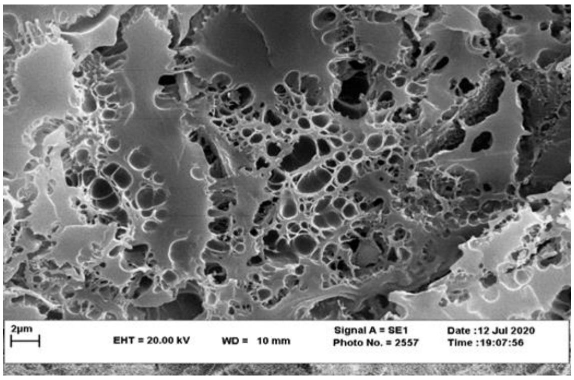
	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۴ گام زمانی	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۳ گام زمانی	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۲ گام زمانی
میزان تخلخل(نتایج تجربی)	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۳۱
میزان تخلخل (نتایج عددی)	۰/۵۷	۰/۵۱	۰/۳۸



(الف)



(ب)



(ج)

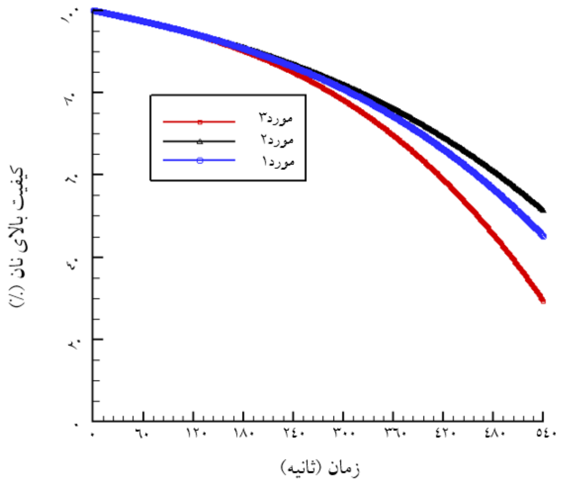
شکل ۹) عکس SEM گرفته‌شده از نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی با بزرگنمایی ۵۰۰۰، (الف) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با چهار پله، (ب) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با سه پله، (ج) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با دو پله

measurment به دست آمده است در نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با چهار پله بیشتر می‌باشد.

۷-۳- روشنایی

۷-۳-۱- مدل‌سازی عددی روشنایی سطح نان

روشنایی نان معرف میزان روشنی آن می‌باشد و دامنه آن از صفر (سیاه خالص) تا ۱۰۰ (سفید خالص) متغیر است. در شکل ۱۰ تغییرات رنگ سطح نان‌های مورد بررسی در طول فرایند پخت به کمک حل عددی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان میزان روشنایی نان برای هر سه پروفیل کاهش یافته است ولی روشنایی سطح نان پخته‌شده با پروفیل‌های صعودی با



شکل ۱۰) مقایسه میزان روشنایی سطح نان پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی به کمک حل عددی

سه و چهار گام زمانی به دلیل حرارت یکنواخت تقریباً یکسان و بیشتر از پروفیل با دو گام زمانی می‌باشد. پروفیل شار حرارتی با دو گام زمانی به دلیل حرارت زیاد در طول فرایند پخت روشنایی کمتری دارد و نان حالت سوخته پیدا می‌کند. مطابق با مرجع[23] روشنایی بین ٤۰ تا ۵۰ برای نان پخته‌شده مناسب و کیفیت نان مطلوب می‌باشد که در نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی با چهار گام زمانی مشاهده می‌شود.

۷-۳-۲- بررسی تجربی روشنایی سطح نان

در بررسی تجربی رنگ پوسته نان، تکه‌های نان با ابعاد مشخص از قسمت‌های میانی و حاشیه نان انتخاب می‌گردد و با استفاده از رنگ سنج Iwave که رنگ را به صورت یک عدد به شکل L^* تعریف می‌کند روشنایی سطح نان اندازه‌گیری می‌شود. شاخص L^* معرف میزان روشنی نمونه می‌باشد و دامنه آن از صفر(سیاه خالص) تا ۱۰۰ (سفید خالص) متغیر است. در شکل ٦ نان‌های پخته‌شده به منظور بررسی تجربی روشنایی سطح نان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۳ مشاهده می‌شود نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با دو پله (عدد روشنایی ٣٤) سیاه‌تر و نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی سه پله‌ای(عدد روشنایی ٥٥) سفیدتر می‌باشد و روشنایی بیشتری دارد ولی با توجه به مرجع[23] روشنایی نان با شار حرارتی چهار پله(عدد روشنایی ٤١) مطلوب‌تر می‌باشد. با توجه به شکل ٦ و به دلیل شار حرارتی کمتر در انتهای فرایند پخت (در انتهای فرایند پخت در پروفیل با سه پله، فرایند پخت با ۷۰ درصد توان حرارتی انجام می‌شود درحالی‌که در پروفیل‌های چهار و دو پله، انتهای فرایند پخت با ۸۰ درصد توان حرارتی انجام می‌شود) ، سطح نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی سه پله‌ای از بقیه روشن‌تر می‌باشد.

در جدول ۳ شاخص L^* برای نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل حرارتی با دو روش تجربی و عددی قرار داده شده است.

شکل ۱۱) مقایسه میزان روشنایی سطح نان پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی، (الف) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با ۴ پله، (ب) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با ۳ پله، (ج) نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با ۲ پله

جدول ۳) مقایسه روشنایی سطح نان‌های پخته‌شده با سه پروفیل شار حرارتی پله‌ای صعودی به روش تجربی و عددی

	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۴ گام زمانی	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۳ گام	نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی پله‌ای با ۲ گام زمانی
روشنایی سطح نان(تجربی)(بدون بعد)	۴۱	۵۵	۳۴
روشنایی سطح نان(عددی)(بدون بعد)	۴۸	۵۰	۳۱

۸- نتیجه‌گیری

به طور کلی انتقال حرارت در نان را می‌توان ناشی از عواملی چون هدایت حرارتی در ماده جامد(آرد)، رطوبت به شکل مایع و مواد گازی (بخار و هوا) و تبخیر و چگالش بخار نفوذ کرده به داخل نان در نقاط سرد داخلی دانست. در این پژوهش، دستگاه پخت نان به منظور تغییر شار حرارتی ساخته شد. همچنین انتقال گرما، جرم، میزان تخلخل و روشنایی سطح نان در هنگام پخت، با استفاده از

روش تفاضل محدود مدل‌سازی شد. نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر داشتند. در ادامه به نتایج حاصل‌شده از این پژوهش پرداخته می‌شود:

۱- مشاهده گردید در زمان ایجاد پله و تغیر شار حرارتی، در نمودارهای مربوط به دمای نقاط مختلف نان پله و شکستگی ایجاد می‌شود. در نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی دو پله‌ای به دلیل ایجاد یک پله و پخت نان در توان حرارتی بالا مخصوصاً در انتهای فرایند پخت، پارامترهای مربوط به کیفیت نان از جمله تخلخل و روشنایی افت پیدا می‌کنند.

۲- با توجه به مدل‌سازی‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی مشخص گردید که با گذشت زمان روشنایی سطح نان و میزان تخلخل برای نان‌های پخته‌شده با هر سه پروفیل شار حرارتی به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

۳- با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی مشخص گردید نان پخته‌شده با پروفیل شار حرارتی صعودی با چهار گام زمانی دارای تخلخل بیشتر و میانگین مقادیر قطر و مساحت منافذ آن نسبت به پروفیل‌های دیگر بیشتر است.

٤- با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید روشنایی نان پخته‌شده با پروفیل حرارتی با چهار گام زمانی در محدوده استاندارد می‌باشد.

۵- با توجه به پروفیل‌های شار حرارتی مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت در فرایند پخت نان هر چه شار حرارتی با گذشت زمان ملایم‌تر و در پله‌های بیشتر، افزایش یابد کیفیت نان پخته‌شده بهتر می‌شود.

٦- نوع پروفیل شار حرارتی می‌تواند پارامتری تأثیرگذار در کیفیت نان پخته‌شده از جمله میزان تخلخل و روشنایی سطح نان باشد.

۹- فهرست علائم

Δt	گام زمانی
Δx	گام مکانی در راستای x
Δy	گام مکانی در راستای y
K	ضریب هدایت گرمایی
ρ	دانسیته
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
λ	گرمای نهان تبخیر
$V_0(x,y)$	میدان بخار آب در لحظه اولیه
$W_0(x,y)$	میدان رطوبت در لحظه اولیه
T_{air}	دمای هوای اطراف در هنگام پخت
θ	نسبت حجمی بخار آب و هوا(تخلخل)
k_{eq}	ضریب هدایت گرمایی معادل در محیط متخلخل
C_{eq}	ظرفیت گرمایی ویژه معادل در محیط متخلخل
D_w	ضریب دیفیوژن رطوبت در حالت مایع
D_v	ضریب دیفیوژن بخار
h_v	ضریب انتقال جرم جابجایي بخار
h_w	ضریب انتقال جرم جابجایي آب
T_{air}	دمای هوای اطراف در هنگام پخت
W_{air}	رطوبت هوای اطراف در هنگام پخت
$T_0(x,y)$	میدان دما در لحظه اولیه
L, l	طول و عرض نان

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: یافته‌های این مقاله (به طور کامل یا بخشی از آن) در نشریه دیگری منتشرنشده و همچنین تحت داوری مجله دیگری نیست.

تعارض منافع: پژوهش صورت گرفته تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: هادی افکار (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقدمه/ نگارنده بحث/ تحلیل گر داده‌ها (٤٠٪). علی کیانی فر(نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/روش شناس/تحلیل‌گر داده‌ها (۳۰٪). حسین زمانی(نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیل گر داده‌ها/روش شناس (۳۰٪).

منابع مالی: منابع مالی این پژوهش از اعتبارات موسسه‌ای تأمین نگردیده است.

منابع

1- Jefferson DR, Lacey AA, Sadd PA. Crust density in bread baking: Mathematical modelling and numerical solutions. Applied Mathematical Modelling. 2007;31(2):209-25.

2- Chiotellis E, Campbell GM. Proving of bread dough I: modelling the evolution of the bubble size distribution. Food and Bioproducts Processing. 2003;81(3):194-206.

3- Bellido GG, Scanlon MG, Sapirstein HD, Page JH. Use of a pressuremeter to measure the kinetics of carbon dioxide evolution in chemically leavened wheat flour dough. Journal of agricultural and food chemistry. 2008;56(21):9855-61.

4- Bellido GG, Scanlon MG, Page JH. Measurement of dough specific volume in chemically leavened dough systems. Journal of Cereal Science. 2009;49(2):212-8.

5- Salagnac P, Glouannec P, Lecharpentier D. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. International Journal of heat and mass transfer. 2004;47(19-20):4479-89.

6- Wagner MJ, Lucas T, Le Ray D, Trystram G. Water transport in bread during baking. Journal of Food Engineering. 2007;78(4):1167-73.

7- Jefferson DR, Lacey AA, Sadd PA. Understanding crust formation during baking. Journal of food engineering. 2006;75(4):515-21.

8- Mondal A, Datta AK. Bread baking–A review. Journal of Food Engineering. 2008;86(4):465-74.

9- Andersson R, Hämäläinen M, Åman P. Predictive modelling of the bread-making performance and dough properties of wheat. Journal of Cereal Science. 1994;20(2):129-38.

10- Ahrné L, Andersson CG, Floberg P, Rosén J, Lingnert H. Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking. LWT-Food Science and Technology. 2007;40(10):1708-15.
11- Purlis E, Salvadori VO. A moving boundary problem in a food material undergoing volume change–simulation of bread baking. Food Research International. 2010;43(4):949-58.
12- Vries UD, Sluimer P, Bloksma AH. A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking. Cereal Science and technology, Ystad, Sweden, 1988:174-188.
13- Thorvaldsson K, Janestad H. A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion. Journal of food engineering. 1999;40(3):167-72.
14- Broyart B, Trystram G. Modelling of heat and mass transfer phenomena and quality changes during continuous biscuit baking using both deductive and inductive (neural network) modelling principles. Food and Bioproducts Processing. 2003;81(4):316-26.
15- Datta AK, Sahin S, Sumnu G, Keskin SO. Porous media characterization of breads baked using novel heating modes. Journal of Food Engineering. 2007;79(1):106-16.
16- Wählby U, Skjöldebrand C. Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. Journal of Food Engineering. 2002 J;53(2):177-84.
17- Zanoni B, Peri C, Pierucci S. A study of the bread-baking process. I: A phenomenological model. Journal of food engineering. 1993;19:389-398.
18- Nicolas V, Salagnac P, Glouannec P, Ploteau JP, Jury V, Boillereaux L. Modelling heat and mass transfer in deformable porous media: Application to bread baking. Journal of Food Engineering. 2014;130:23-35.
19- Datta AK. Handbook of microwave technology for food application. CRC Press; 2001.
20- Fan J, Mitchell JR, Blanshard JM. A model for the oven rise of dough during baking. Journal of Food Engineering. 1999;41(2):69-77.
21- Hong SW, Yan ZY, Otterburn MS, McCarthy MJ. Magnetic resonance imaging (MRI) of a cookie in comparison with time-lapse photographic analysis (TLPA) during baking process. Magnetic resonance imaging. 1996;14(7-8):923-7.
22- Mondal A, Datta AK. Two-dimensional CFD modeling and simulation of crustless bread baking process. Journal of food Engineering. 2010;99(2):166-74.
23- Papasidero D, Pierucci S, Manenti F. Energy optimization of bread baking process undergoing quality constraints. Energy. 2016;116:1417-22.
24- Sharma V, Bhardwaj A. Scanning electron microscopy (SEM) in food quality evaluation. InEvaluation Technologies for Food Quality. Woodhead Publishing. 2019: 743-761.