



## بررسی وضعیت زمانی و مکانی توزیع تخلخل خمیر نان در مرحله تخمیر با بهره‌گیری از سی‌تی‌اسکن و پردازش تصویر

فاطمه السادات ناظری<sup>۱</sup>، مهدی کدیور<sup>۲\*</sup>، ایمان ایزدی<sup>۳</sup>، میلاد فتحی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. استادیار، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴. استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: 96/2/10، تاریخ آخرین بازنگری: 96/3/8، تاریخ پذیرش: 96/4/25)

### چکیده

نان یک ماده غذایی متخلخل با بافت اسفنجی می‌باشد. با توجه به اهمیت توزیع تخلخل در خمیر نان از منظر اثرگذاری بر هدایت حرارتی که در مرحله پخت نان حائز اهمیت است و از سویی ارتباط مستقیم آن با ورآمدن و تغییرات حجم خمیر، بررسی توزیع تخلخل در خمیر نان ضرورت داشته و به‌عنوان اساس این پژوهش برگزیده شده است. از میان روش‌های قابل استفاده جهت بررسی تخلخل، روش تصویربرداری به کمک پرتونگاری مقطعی با سی‌تی‌اسکن و پردازش تصویر انتخاب شد. برای انجام این پژوهش سه گام عملیاتی صورت گرفت: (۱) تهیه خمیر نان با فرمولاسیون مشخص و شرایط تعیین شده (۲) تصویربرداری از خمیر در حال تخمیر، توسط دستگاه سی‌تی‌اسکن در چهار زمان مشخص 35، 70، 90 و 160 دقیقه در طول تخمیر (۳) محاسبه کمی و کیفی توزیع تخلخل در راستای زمان تخمیر و مکان مقطع مورد بررسی در خمیر، در وضعیت‌های جانبی، میانی و مرکزی و نیز دستیابی به الگوی پراکندگی تخلخل در هر مقطع خمیر. پارامترهای نامبرده، از طریق پیاده‌سازی تکنیک‌های پردازش تصویر بر عکس‌های حاصل از سی‌تی‌اسکن قابل استحصال بوده و نتایج نهایی قابلیت تفسیر و مقایسه داشتند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که تغییرات تخلخل در طی سپری شدن زمان تخمیر، شیب صعودی داشته و رو به افزایش بود. میزان و پیوستگی توزیع تخلخل در مقاطع مرکزی بیش‌تر از بخش‌های میانی و جانبی بود. در حقیقت توزیع تخلخل در نزدیکی پوسته خمیر در حداقل بوده، با نزدیک شدن به سمت مرکز افزایش یافته و در مرکز خمیر به حداکثر خود رسید. توزیع حفرات در هر مقطع، بیش‌تر در بخش قاعده خمیر متمرکز بود. با توجه به عکس‌های حاصل، همواره روند رشد و توزیع تخلخل از قاعده خمیر رو به بالا بود. با این‌حال در نهایت هر دو بخش متخلخل نامبرده، به هم پیوسته و ساختار متخلخل یکدستی حاصل گشت.

واژه‌های کلیدی: توزیع تخلخل، سی‌تی‌اسکن، پردازش تصویر، خمیر نان، تخمیر.

## 1- مقدمه

## 1-1- نان به‌عنوان ماده‌ای اسفنجی و متخلخل

نان قوت غالب انسان است که فرایند تولید آن از سه بخش اصلی اختلاط، تخمیر و پخت تشکیل شده و دارای بافتی متخلخل است [1]. فرایند مخلوط کردن، حباب‌های هوا را وارد بافت خمیر کرده و تداوم این فرایند سبب شکسته شدن، کاهش اندازه میانگین و افزایش تعداد حباب‌ها می‌شود. در حقیقت انرژی و زمان به کار رفته جهت مخلوط کردن بر توزیع اندازه حباب‌ها اثرگذار است که خود بر رشد آن‌ها در مرحله تخمیر و به این ترتیب بر ساختار نهایی نان تأثیرگذار خواهد بود [2].

سلول‌های گازی در یک فاز مایع پیوسته قرار دارند و این فاز مایع کف‌مانند در حین پخت تثبیت شده و ساختار کف مانند با ساختار پیوسته‌ای جایگزین آن می‌شود [3]. رشد حباب‌های هوا در طول تخمیر به وسیله عواملی از قبیل مقدار کربن دی‌اکسید، سرعت تولید و انتشار آن و نیز سرعت به هم آمیختن حباب‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد [4].

## 2-1- ساختارهای متخلخل غذایی

ساختارهای متخلخل مجموعه‌ای از منافذ، مجراها و شکاف‌های میکروسکوپی هستند که بسته به نوع و ماهیت ماده غذایی و نوع و شرایط فرایند در اشکال و اندازه‌های مختلف در بافت ماده غذایی وجود دارند و یا شکل می‌گیرند. توصیف ساختارهای متخلخل به‌طور معمول با استفاده از توزیع اندازه حفرات موجود در آن‌ها از نظر قطر، شکل و ضخامت دیواره‌های جداکننده حفرات صورت می‌گیرد. در عمل یکی از مشکلات حاکم در پیش‌بینی فرایندهای مواد متخلخل، هدایت حرارتی آن‌ها است [5، 6].

## 3-1- روش‌های بررسی تخلخل

روش‌های اندازه‌گیری ساختار حفرات در مواد غذایی براساس نوع عملکرد و دقت به دو دسته تقسیم می‌شوند: 1- روش‌های نفوذ موئینگی مانند تخلخل سنج‌های حیوه‌ای و اکستروژن مایع 2- روش‌های تصویری مانند روش‌های میکروسکوپی و آنالیز رقمی تصاویر [7]. محققان با تهیه نقشه ریزساختار خمیر

و بررسی تخلخل در آن از طریق XRT<sup>1</sup>، MRI<sup>2</sup>، فلورسنس و روش‌های میکروسکوپی مانند SEM و ESEM<sup>3</sup> به اطلاعات زیادی در مورد وضعیت حباب‌های گازی دست یافتند. محققان، تکنیک پردازش تصویر را، از طریق ابزارهای متعدد و در دو مقیاس میکروسکوپی برای بررسی ساختار و مواد سلولی و ماکروسکوپی به منظور پایش سطح و حجم خمیر به کار گرفته‌اند [8]. روش‌های رادیوگرافی همانند ام‌آر‌آی و سی‌تی‌اسکن به سبب قابلیت تمایز بخش‌های متخلخل از بافت خمیر و نمایش دقیق این مجموعه در عکس‌های حاصل، مورد توجه عده‌ای از محققان واقع شدند [7]. گوئتر و همکاران با استفاده از تصویربرداری رزونانس مغناطیسی، به مطالعه ساختار خمیر طی افزایش حجم پرداخته و عکس‌های دو بعدی حاصل نمودند. این روش عکس‌برداری به‌عنوان روشی غیرمخرب و نامتعارض است و از روش‌های توسعه‌یافته برای بررسی خمیر به‌شمار می‌رود [9] که عدم مقاومت خمیر را به‌وسیله نمایش تحول ساختار سلولی حاصل می‌کند و پارامترهایی چون حجم و تخلخل را ارائه می‌نماید [10].

## 4-1- مقطع‌برداری با اشعه‌ی ایکس

نخستین بار تکنیک اولیه‌ی توموگرافی -پرتونگاری مقطعی- به‌منظور نمایش نحوه جذب مواد استفاده شد. در مورد خمیر، بهره‌گیری از این تکنیک به سبب قدرت تمایز بین ماتریکس گلوتن-نشاسته از سلول‌های گاز است. این روش پارامترهایی چون توزیع اندازه حباب‌ها، ضخامت دیواره و حجم هر حباب، تخلخل و شاخص پیوستگی را بررسی می‌کند [11]. داده‌های حاصل از این روش فرضیه وجود لاملا یعنی فیلم مایعی که حباب‌ها را جدا می‌نماید، تأیید می‌کند؛ ولیکن قادر به تشخیص ساختار یا ترکیبات تشکیل‌دهنده این فیلم نیست [12، 13]. این روش به مطالعه کینتیک رشد حباب‌ها در خمیر آرد گندم در طول تخمیر می‌پردازد [14]. از جمله مزایای این روش این است که غیرتخریبی بوده و نیاز به آماده‌سازی ندارد [15]. وایت‌وورث و آلاوا از سی‌تی‌اسکن به منظور مشاهده ویرآمدن خمیر استفاده کردند و نشان دادند که خمیرهای حاصل از روش‌های مختلف تولید نان، در رشد و رفتار به هم آمیختگی

1. X-Ray Tomography

2. Magnetic Resonance Imaging

3. Environment Scanning Electron Microscopy

حباب‌ها تفاوت‌هایی را نشان می‌دهند که در پایان تخمیر کاملاً مشهود است [16]. پارامترهای نامبرده، از طریق پیاده‌سازی تکنیک‌های پردازش تصویر بر عکس‌های حاصل از سی‌تی‌اسکن قابل استحصال بوده و نتایج نهایی قابلیت تفسیر و مقایسه داشتند.

### 1-5- پردازش تصویر

در سال‌های اخیر پردازش تصویر به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت ارزیابی عددی خصوصیات خمیر و نان مطرح بوده است. بابین و همکاران به مطالعه تغییرات حفرات خمیر طی افزایش حجم پرداختند و با بهره‌گیری از پردازش تصویر به یافته‌هایی در باب رشد حباب‌ها و تکامل ساختار سلولی در خمیر و نان دست یافتند [12، 13]. رومانو و همکاران به‌وسیله پردازش تصویر، تغییرات حجم خمیر را طی زمان مورد ارزیابی قرار دادند و منحنی تغییرات حجم خمیر را مشابه رشد مخمرها و به صورت هلالی گزارش کردند [17]. پردازش تصویر فرایندی مرحله به مرحله است که آستانه‌گذاری جزء اولین مراحل آن محسوب می‌شود. شاید ده‌ها روش برای این کار وجود داشته باشد که کارایی همه آن‌ها در تقطیع تصویر یکسان نیست. آستانه‌گذاری روشی است که در آن اشیاء مورد نظر از پس‌زمینه حذف شده و یا دو جسم از همدیگر تمیز داده می‌شوند [18].

### 1-6- اهداف پژوهش

با توجه به اهمیت توزیع تخلخل در خمیر از منظر اثرگذاری بر هدایت حرارتی که در مرحله پخت حائز اهمیت است و از سویی ارتباط مستقیم آن با ورآمدن و تغییرات حجم خمیر، بررسی این موضوع با استفاده روش سی‌تی‌اسکن و پردازش تصویر به‌عنوان اساس این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. محققان در گذشته، بیش‌تر بر ریزساختار حباب‌ها و روند تغییرات حباب‌های منفرد متمرکز بوده‌اند و مستنداتی مبنی بر به‌کارگیری این روش و نیز دیگر روش‌های متمرکز در این زمینه در راستای بررسی توزیع زمانی-مکانی تخلخل در خمیر در حین مرحله تخمیر مشاهده نشده است. در این پژوهش تغییرات تخلخل خمیر نان طی یک فرایند 160 دقیقه‌ای تخمیر در زمان‌های 35، 70، 90 و 160 دقیقه، روند تغییرات تخلخل در طی زمان، تفاوت توزیع تخلخل در مقاطع جانبی، میانی و مرکزی خمیر بررسی شده و شدت تخلخل در نواحی بالایی و پایینی یک مقطع خمیر نیز ارزیابی شده است.

### 2- مواد و روش‌ها

#### 2-1- روش تهیه خمیر

برای انجام آزمون ابتدا مواد اولیه هم‌دم شده و به دمای محیط رسیدند. سپس هر یک از مواد اولیه توزین شدند. فرمول تشکیل دهنده خمیر شامل آرد گندم، آب، نمک و مخمر به‌ترتیب با نسبت استفاده 2، 53، 100 و 1/5 درصد بود. به منظور فعال‌سازی مخمر، مخمر و نمک به همراه نیمی از آب مورد استفاده برای تهیه خمیر مخلوط گردید و به مدت 20 دقیقه در آن هریوس، مدل UT505E، ساخت سوئیس 38 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس مخمر فعال شده به آرد افزوده شد و جهت تهیه خمیر چهار مرحله سپری شد: اختلاط به مدت 10 دقیقه با دنده 200 مخلوط‌کن هوبارت، مدل G100، ساخت آمریکا، 5 دقیقه استراحت خمیر، 5 دقیقه اختلاط با دنده 150 و در نهایت 5 دقیقه ورز دستی و چانه‌گیری خمیر. در نهایت یک چانه خمیر با ارتفاع حدود 6 سانتی‌متر و قطر قاعده حدود 10 سانتی‌متر تهیه و در ظرف استوانه‌ای از جنس پلاستیک، با ارتفاع 15 سانتی‌متر و قاعده 10 سانتی‌متر قرار داده شد. به‌منظور جلوگیری از چسبیدن خمیر به دیواره‌های ظرف و کاهش اثر ممانعتی حاصل از چسبیدن خمیر بر افزایش حجم آن، ظرف پیش از قرار دادن خمیر در آن به گلیسرول آغشته شد. خمیر پس از آماده شدن در انکوباتور تخمیر با دمای 33 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 85 درصد قرار داده شد و در زمان‌های 35، 70، 90 و 160 دقیقه به‌منظور عکس‌برداری از انکوباتور خارج گردید. انتخاب زمان‌های مذکور بر مبنای نمودار فشار-زمان خمیر آرد مورد آزمون صورت گرفت. در واقع بر اساس الگوی شکلی نمودار و روند تغییرات فشار خمیر، زمان‌های مربوطه انتخاب گردید. داده‌های فشار-زمان در دست انتشار می‌باشند.

#### 2-2- روش تصویربرداری از خمیر

به‌منظور تصویربرداری در زمان‌های 35، 70، 90 و 160 دقیقه،

از مقاطع مرکزی که دارای بیش‌ترین انبساط بودند انتخاب شدند. برای بررسی تخلخل طی زمان، در هر سری زمانی تصاویر از مقاطع مرکزی که دارای بیش‌ترین انبساط بودند انتخاب شدند. برای بررسی توزیع تخلخل در مقاطع خمیر از سه محل کناره، میانه و مرکز خمیر تصویر مقاطع انتخاب شد و در نهایت برای بررسی توزیع تخلخل در هر مقطع، مقاطع مرکزی و جانبی در همه‌زمان‌ها به صورت جداگانه انتخاب شدند. تصاویر منتخب جهت کمی‌سازی مقدار تخلخل به فضای نرم‌افزار ImageJ انتقال داده شد سپس طی انجام مراحل تغییر یافته و تخلخل محاسبه گردید. ابتدا با توجه به محل بررسی توزیع تخلخل، از هر تصویر قطعاتی با اندازه مشخص و برابر از پیکسل انتخاب گردیده و جداسازی شد. کنتراست تصاویر جداسازی شده به حالت بهینه تغییر داده شد. با فعال کردن قسمت 8 بیتی، تصاویر از فرمت RGB خارج و تصاویر سطح خاکستری و سپس تصاویر دودویی، ایجاد گردید. این تصاویر مجموعه‌ای از نقاط روشن و تاریک است که در آن نسبت نقاط روشن به تاریک به‌عنوان شاخصی از میزان تخلخل نمونه‌ها برآورد می‌شود. بدیهی است که هر قدر این نسبت بیش‌تر باشد بدین معناست که میزان حفرات موجود در بافت نمونه یعنی میزان تخلخل بیش‌تر است. پس از تهیه تصاویر دودویی فرایند آستانه‌سازی بر مبنای رنگ قرمز و در حالت سیاه و سفید اعمال و زمینه حذف شد. در نهایت با فعال کردن قسمت Analysis particle نرم‌افزار، حفرات موجود در بافت مورد آنالیز قرار گرفت و نسبت سطوح تیره محاسبه و درصد تخلخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [19، 20]. پس از برآورد میزان عددی تخلخل، نمودارهای مربوطه به‌وسیله نرم‌افزار Excel ترسیم شد.

نمونه از انکوباتور خارج گردیده، به بیمارستان کاشانی اصفهان انتقال یافته و توسط دستگاه سی‌تی‌اسکن شیمادزو، مدل PC-7800، ساخت ترکیه عکس‌برداری شد. همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده است ظرف حاوی نمونه خمیر به صورت قائم زیر دستگاه قرار گرفت. مدت زمان تصویربرداری 30 ثانیه بوده و تا پیش از قرارگیری در دستگاه سی‌تی‌اسکن، نمونه در دمای 38 درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

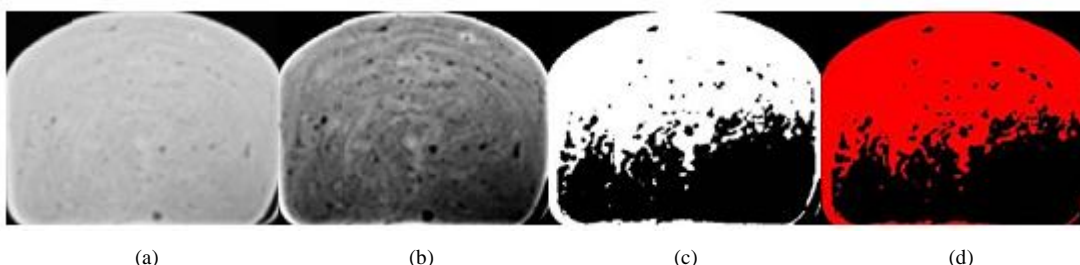


شکل (1) نحوه قرارگیری نمونه خمیر در دستگاه سی‌تی‌اسکن

Fig. 1 The dough sample placement mode in the CT-scan instrument

### 3-2- روش پردازش تصویر

تصاویر اولیه گرفته شده از خمیر، با استفاده از نرم‌افزار Pacsplus CD Viewer قابل دسترس بود. عکس‌ها توسط نرم‌افزار Snagit جداسازی و در فرمت tif ذخیره شد. به منظور پیاده‌سازی تکنیک پردازش تصویر، تعدادی از تصاویر انتخاب شدند. برای بررسی تخلخل طی زمان، در هر سری زمانی تصاویر



شکل (2) نمونه تصویر تبدیل شده به ترتیب از چپ به راست: (a) نمونه اصلی تصویر سی‌تی‌اسکن خمیر (b) نمونه تصویر با مقیاس خاکستری و بهینه درجه تباین (c) نمونه تصویر دودویی (d) نمونه تصویر آستانه گذاری شده با رنگ قرمز

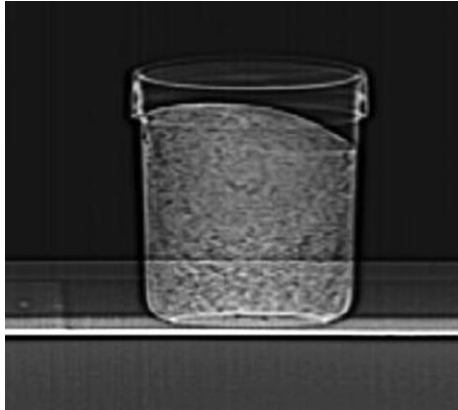
Fig. 2 The converted images of sample left to right respectively: a) Main image of dough sample. b) Image with gray scale and optimal contrast degree. c) Binary image. d) Thresholded image in red.

## 3- نتایج و بحث

## 1-3- تصاویر مقاطع خمیر

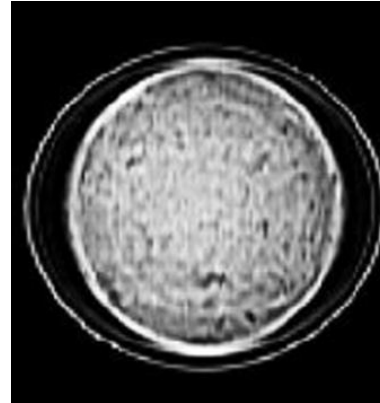
جانبی مانند شکل (4) قابل انجام بود؛ تصویربرداری مقاطع به صورت جانبی انجام گرفت. شکل (5) تصاویر مقاطع گرفته شده از خمیر در طول زمان تخمیر که خروجی نرم افزار Snagit

تصویربرداری مقاطع در دو حالت افقی مانند شکل (3) و



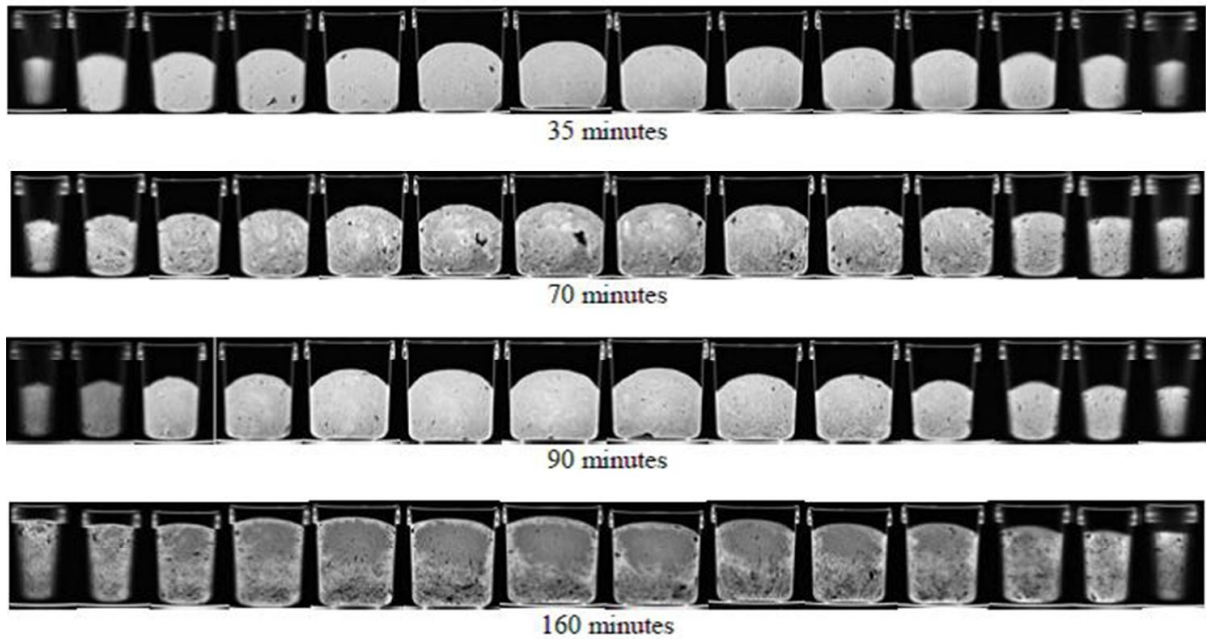
شکل (4) تصویر گرفته شده از خمیر توسط دستگاه سی تی اسکن، نمای مقطع جانبی خمیر

Fig. 4 Image taken from the dough by the device, the side view of the dough



شکل (3) تصویر گرفته شده از خمیر توسط دستگاه سی تی اسکن، نمای مقطع افقی خمیر

Fig. 3 Image taken from the dough by the device, the horizontal cross section of the dough



شکل (5) منتخبی از تصاویر گرفته شده توسط دستگاه از مقاطع مختلف خمیر در چهار زمان فرایند تخمیر

در هر سری عکس، 14 مقطع خمیر به نمایش در آمده. در ابتدا و انتها مقاطع جانبی، در وسط مقاطع مرکزی و بین این دو دسته مقاطع میانی می باشد.

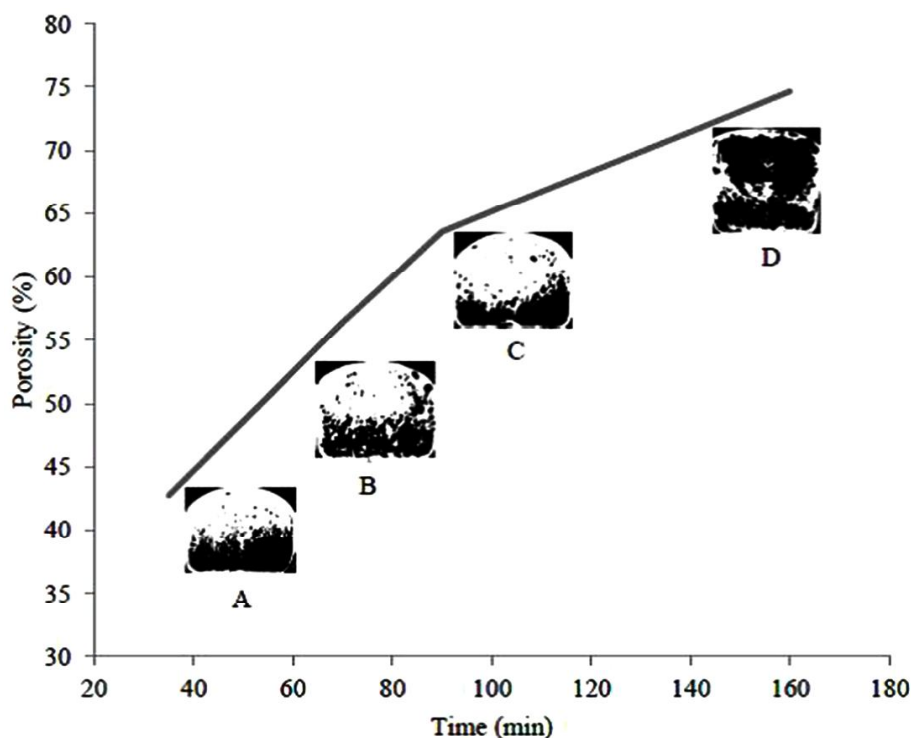
Fig. 5 Selection of images taken by the device from different sections of the dough during the four part of fermentation time (35, 70, 90 and 160 minutes). In each photo series, 14 sections of dough are displayed. Indicated Images at the beginning and the end of series are related to the dough lateral sections, those in the middle are of the central sections and between the two mentioned parts are the middle sections of the dough.

### 3-2- بررسی روند تغییرات تخلخل خمیر در طول زمان تخمیر

شکل (6) نشان‌دهنده نمودار تخلخل بافت خمیر-زمان تخمیر است که شدت تخلخل خمیر را در مقطعی با بیش‌ترین میزان انبساط یعنی مقاطع مرکزی در 4 زمان تصویربرداری مراحل تخمیر نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، تغییرات تخلخل در طی سپری شدن زمان تخمیر شیب صعودی داشته و همواره رو به افزایش است. از سویی شیب تغییرات تخلخل تا رسیدن به زمان 90 دقیقه یعنی سومین مرحله یکنواخت بوده و سپس طی فاصله زمانی 90 تا 160 دقیقه شیب تغییرات تغییر کرده و کاهش می‌یابد. نمودار موجود در شکل (6) حاکی از آن است که تخمیر طی زمان به دو بخش اصلی تقسیم شده است. در مراحل اولیه تخمیر یعنی 1 به 3 با توجه به تولیدات گازی مخمرها، ظرفیت اشباع فاز آبی و قابلیت الحاق هسته‌های هوا،

هستند را به نمایش می‌گذارد. در واقع 36 مقطع از خمیر توسط دستگاه سی‌تی‌اسکن تصویربرداری شد. با توجه به این که عرض قاعده خمیر 10 سانتی‌متر بود، فاصله مقاطع در حدود 2 mm انتخاب شد. روند تصویربرداری به صورتی بود که دستگاه از یک طرف خمیر شروع به مقطع‌گیری نموده و به همین ترتیب تا مرکز خمیر پیش رفته و سپس از مرکز تا سوی دیگر خمیر را نیز تصویربرداری نموده است. نحوه مقطع‌برداری به گونه‌ای بود که مقاطع ابتدایی و انتهایی نازک‌تر و کوچک‌تر بوده و به تدریج مقطع بزرگ‌تر می‌شد تا این که به اندازه واقعی ظرف خمیر می‌رسید. در تصاویر اصلی پردازش نشده قسمت‌های تاریک حفرات را نشان می‌دادند.

در هر سری عکس، 14 مقطع خمیر به نمایش درآمده. در ابتدا و انتها مقاطع جانبی، در وسط مقاطع مرکزی و بین این دو دسته مقاطع میانی می‌باشند.



تصاویر موجود در کنار نمودار مربوط به مقطع مرکزی خمیر در همان زمان می‌باشد؛ a) 35 دقیقه، b) 70 دقیقه، c) 90 دقیقه، d) 160 دقیقه. تصاویر نامبرده دودویی بوده و در آن‌ها بخش‌های سیاه ساختار متخلخل و بخش‌های سفید بافت خمیر را نشان می‌دهند.

**Fig. 6** Graph of porosity of dough network in percentages and fermentation time in minutes. The images are alongside the graph are of the central section of the dough at the same time. a) 35 minutes, b) 70 minutes, c) 90 minutes, d) 160 minutes. The images are binary, in which the portions of the black structure are porous and white parts are of the dough substance.

نمودار درج شده است، نیز به خوبی گویای این پدیده گسترش می‌باشد. تصاویر نامبرده دودویی بوده و در آن‌ها بخش‌های سیاه ساختار متخلخل و بخش‌های سفید بافت خمیر را نشان می‌دهند.

### 3-3- بررسی روند تغییرات تخلخل در مقاطع مختلف خمیر

نمودار تخلخل بافت خمیر-مکان مقطع که در شکل (7) نشان داده شده گویای آن است که تخلخل با پیشروی در مقاطع از نواحی جانبی به سمت مرکز خمیر افزایش می‌یابد. در حقیقت توزیع تخلخل در نزدیکی پوسته خمیر در حداقل است و با نزدیک شدن به سمت مرکز افزایش یافته و در مرکز خمیر به حداکثر خود می‌رسد. قابل توجه است که در بخش جانبی و میانی خمیر با توجه به کم بودن شیب تغییرات تخلخل در این بخش، میزان تخلخل به هم نزدیک‌تر بوده و تخلخل مرکز با شیب زیادی از این دو فاصله گرفته و افزایش یافته است. پس می‌توان چنین اظهار داشت که توزیع تخلخل در کل خمیر چیزی شبیه به دوایر متحدالمرکز تنه درختان است که در بخش مرکزی از تجمع بیش‌تری برخوردار بوده و با دور شدن از مرکز و نزدیک شدن به پوسته از شدت آن کاسته می‌شود. علت رخداد چنین پدیده‌ای آن است که از زمانی که رهایش گاز کربن دی‌اکسید آغاز می‌گردد یعنی زمان 90 دقیقه با توجه به نمودارهای فشار-زمان، با در نظر گرفتن این‌که گازها در حال خروج از خمیر هستند، پس در نزدیکی دیواره خمیر، توزیع تخلخل محدودتر خواهد بود. دیواره‌های خمیر مانند یک غشا با خاصیت تراوایی بوده و امکان تبادل گازها با هوای مجاور خمیر را دارند، به خصوص با توجه به وجود فشارهای داخلی ناشی از الحاق گازها در درون خمیر و اتساع آن، گازها خارج می‌شوند و در نزدیکی پوسته ساختار متخلخل تشکیل نمی‌شود. گاز کربن دی‌اکسید ابتدا در فاز آبی حل شده به صورت کربنیک اسید در می‌آید؛ پس از اشباع کردن فاز آبی، از آن به فرم گازی خارج شده و به فاز گازی خمیر پیوسته، منجر به بزرگ شدن حباب‌ها می‌گردد [21]. در کنار پوسته خمیر گاز به هوای مجاور خمیر وارد می‌شود، بنابراین از مجموعه خمیر خارج می‌شود و در کنار پوسته ساختار متخلخل رویت نمی‌گردد.

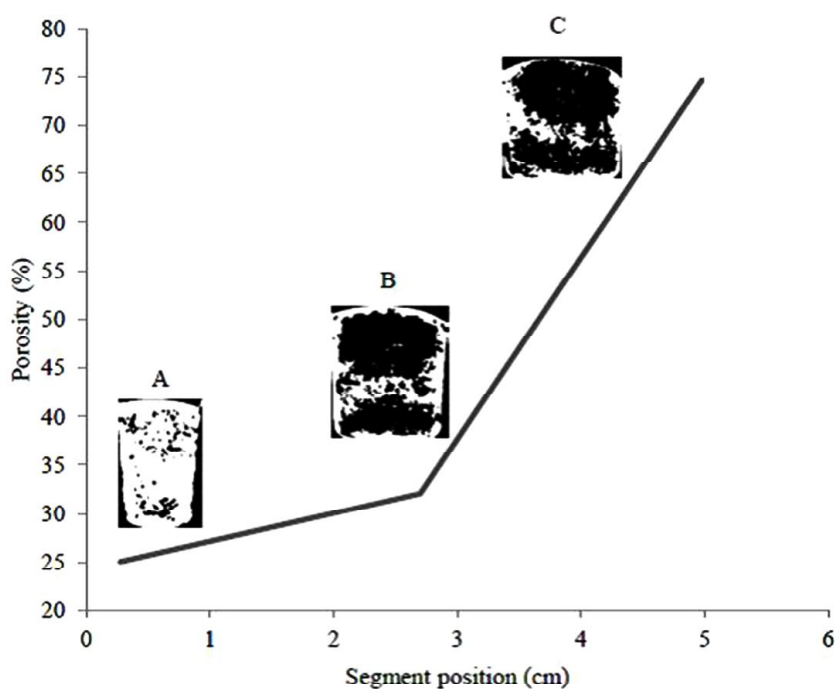
وضعیت به گونه‌ای پیش می‌رود که ساختار متخلخل در خمیر در حال شکل‌گیری است. پس از آن در طول مرحله 3 به 4 به احتمال زیاد ساختار متخلخل تا حد زیادی شکل گرفته است، و طی این مرحله علاوه بر شکل‌گیری بخش‌های نهایی، این ساختار رشد و گسترش یافته و ثبات پیدا می‌کند. در این بخش روند صعودی شیب تغییرات تخلخل هم‌چنان باقی است که می‌تواند به سبب تداوم تولید گاز توسط مخمر و الحاق سلول‌های گازی با هسته‌های هوا باشد. در عین حال شیب تغییرات تخلخل کم‌تر شده است که می‌تواند به خاطر کاهش در سرعت یا میزان تولید گاز توسط مخمر باشد. در این رابطه سه فرضیه مطرح می‌گردد:

1. مخمر در خمیر به لحاظ مکانی ساکن بوده و حرکتی نمی‌کند؛ لذا با کاهش منابع تغذیه‌ای موجود در محل، فعالیت مخمر نیز کم‌تر می‌شود.
2. یکی از متابولیت‌هایی که توسط مخمرها تولید می‌گردد، اتانول است؛ این متابولیت ممکن است به قدری در محل وجود مخمر افزایش یابد که به‌عنوان یک مانع رشد عمل کرده و از رشد مخمرها ممانعت به عمل آورد.
3. تعدادی از مخمرها وارد فاز مرگ خود شده و دیگر قادر به تولید گاز نیستند. دیگر عامل کاهش شیب در این ناحیه می‌تواند مربوط به رهایش گاز کربن دی‌اکسید به‌عنوان عامل مولد توسعه تخلخل، از خمیر باشد. در حقیقت آزاد شدن گاز از خمیر به معنای تبادلات گازی خمیر با محیط پیرامون آن، از ابتدای فرایند تخمیر آغاز می‌شود. ولیکن آزاد شدن گاز به مفهوم رهایش آن در مقادیر بالاتر و به سبب تغییرات مولکولی و رئولوژیک خمیر از یک سو و کم شدن ظرفیت ادغام هسته‌های هوا با گاز تولیدی از سوی دیگر، از زمان به‌خصوصی در طول مرحله تخمیر آغاز می‌شود که بر طبق نمودارهای فشار-زمان آرد مورد آزمون که در دست انتشار می‌باشد، آغاز رهایش مقارن با مرحله سوم است. بنابراین با توجه به رهایش گاز از خمیر، کاهش شیب تا حدی قابل توجیه است. از سویی به نظر می‌رسد که در این مرحله تخلخل از نظر کمی تغییر اندکی یافته؛ هرچند توزیع تخلخل گسترده‌تر شده و ساختار متخلخل، نواحی بسیاری از یک مقطع را پوشش می‌دهد. تصاویر تهیه شده از یک مقطع در طی زمان که در کنار منحنی



کم‌تر بودن فاز آبی منجر به تسریع اشباع شدن آن توسط گاز شده و بنابراین گاز سریع‌تر به حباب‌های اولیه رسیده و منبسط می‌گردد؛ در حالی که در دو طرفین علاوه بر بیش‌تر بودن فاز آبی، احتمالاً شدت تولید گاز نیز کم‌تر می‌باشد. از سویی به دلیلی تخلخل مرکز پیوسته و محسوس است در حالی که تخلخل جانب پراکنده بوده و محسوس و مشخص نیست. از آن‌جا که هوای مجاور خمیر گرم است، لذا دمایی بالاتری نسبت به مرکز دارد و این خود باعث سرعت بخشیدن به فعل و انفعالات و نقل و انتقالات شده و سبب شده که در کناره‌ها گاز به سرعت انتقال یافته و متمرکز نمانده و ساختار متخلخل کاملی تشکیل نشده که حالت پیوسته به خود گرفته و گسترش یابد، و از این رو در مرکز ساختار متخلخل کامل،

نکته قابل توجه دیگر آن است که پیوستگی توزیع تخلخل در مقاطع مرکزی بیش‌تر از بخش‌های میانی و جانبی است. رخداد این پدیده شاید به سبب شدت تمرکز مکانی مخمر در مرکز خمیر، دسترسی بالاتر به مواد مغذی و یا فعالیت بیش‌تر مخمر در مرکز نسبت به جانب باشد. از سویی ممکن است توزیع هسته‌های اولیه هوا در مرکز بیش‌تر باشد یا به لحاظ رئولوژیک در بخش مرکزی قابلیت خمیر برای تشکیل یک شبکه پیوسته‌تر و با ظرفیت بالاتر توزیع تخلخل بیش‌تر باشد. به نظر می‌رسد مخمر در مرکز احتمالاً به دلیل تأمین شرایط بهینه، بیش‌ترین فعالیت تولید گازی را دارد. از سویی تخلخل بیش‌تر مرکز ممکن است به دلیل میزان کم‌تر فاز آبی در مرکز باشد؛ شیب نمودار تخلخل زمان نیز در این‌جا بیش‌تر است.



**شکل (7)** نمودار میزان تخلخل بافت خمیر بر حسب درصد در مقاطع مختلف آن، فاصله بر حسب سانتی‌متر تصاویر موجود در کنار نمودار مربوط به مقطع خمیر در همان مکان و در زمان 160 دقیقه می باشد؛ (a) مقطع جانبی، (b) مقطع میانی، (c) مقطع مرکزی. محور افقی نمودار بر حسب فاصله مقطع تصویربرداری شده از پوسته خارجی خمیر درجه‌بندی شده است. تصاویر نامبرده دودویی بوده و در آن‌ها بخش‌های سیاه ساختار متخلخل و بخش‌های سفید بافت خمیر را نشان می‌دهند.

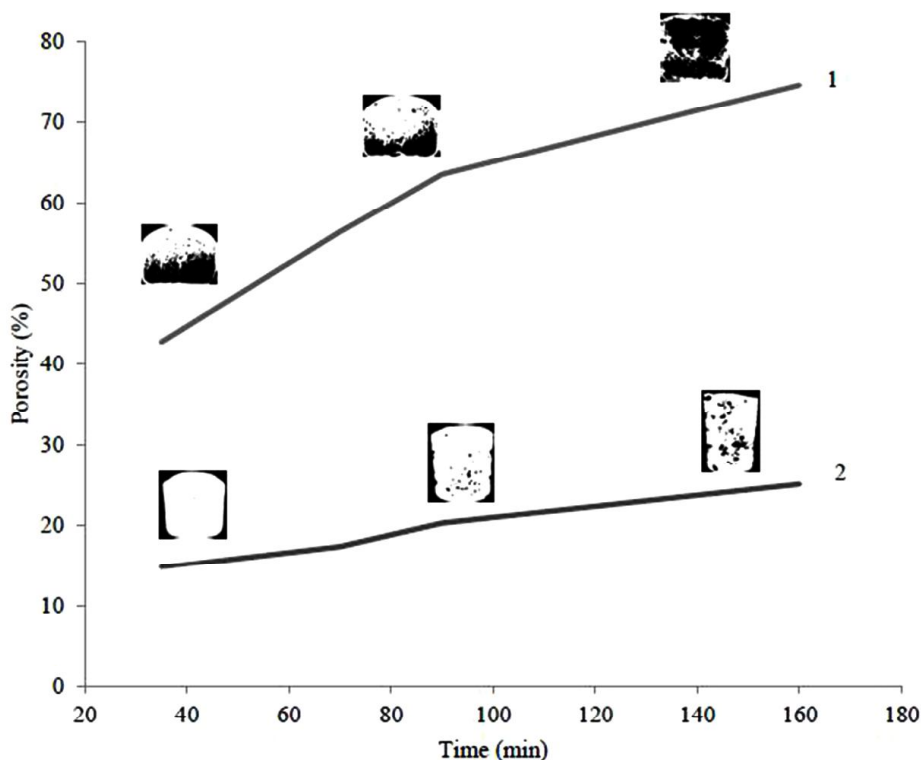
**Fig. 7** Graph of porosity percentages of dough network in different dough sections, distance is in centimeter. The images on the side of the curve are related to dough cross-section in the same place at 160 minutes. a) lateral section, b) middle section, c) central section. The horizontal axis of the graph is graded according to the distance of the imaged section from the outer crust of the dough. The images are binary, in which the portions of the black structure are porous and white parts are of the dough substance.



پیوسته و گسترش یافته دیده می‌شود در حالی که در کناره‌ها ساختار متخلخل مشاهده نشد. مرکز خمیر به عبارتی نقطه سرد خمیر است و سرعت نقل گاز کم‌تر بوده اما به خاطر شدت تولید و این که شیب گاز به سمت فاز گازی است، ساختار متخلخل نسبت به زمان‌های ابتدایی با سرعت بیشتری تشکیل یافته و گسترش می‌یابد. شاهد این پدیده در مرحله تخمیر، در مرحله پخت دیگر مواد متخلخل نیز رخ داده است. رحمان و همکاران ساختار مواد غذایی فراوری شده با روش پخت و اکستروژن را با میکروسکوپ نوری و میکروتوموگرافی بررسی نموده و نشان دادند که توزیع اندازه حفرات به دو صورت بودند: حفرات بزرگ‌تر که در قسمت‌های درونی واقع شده بودند و حفرات کوچک‌تر که در سمت پوسته قرار گرفته بودند.

### 3-4- بررسی تغییرات توزیع تخلخل در راستای مکان- زمان

شکل (8) نشان می‌دهد که شیب تغییرات تخلخل در کناره نسبت به مرکز به‌طور محسوسی کم‌تر است و همین‌طور محدوده تغییرات نیز کم‌تر از مرکز می‌باشد. اما در عین حال الگوی رفتاری نمودار از ثبات نسبی برخوردار بوده و در هر دو حالت نمودارها از دو بخش تشکیل یافته: بخش اول مربوط به



شکل (8) نمودارهای میزان تخلخل بافت خمیر بر حسب درصد-زمان تخمیر بر حسب دقیقه در مقاطع مرکزی 1 و جانبی 2 تصاویر موجود در کنار نمودارها مربوط به مقطع خمیر در همان زمان می‌باشد که سه زمان 35، 90 و 160 دقیقه انتخاب شده است. تصاویر نامبرده دودویی بوده و در آن‌ها بخش‌های سیاه ساختار متخلخل و بخش‌های سفید بافت خمیر نشان می‌دهند.

**Fig. 8** Graph of porosity percentages of dough network - fermentation time in minutes in the central section 1 and lateral section 2. The images present alongside the graph are related to the dough section at the same time. Three times are selected; 35, 90 and 160 minutes. The images are binary, in which the portions of the black structure are porous and white parts are of the dough substance.

مقاطع بعدی نیز هم‌چنان ساختار متخلخل پیوسته‌ای تشکیل نیافته است و صرفاً حفرات پراکنده‌ای روی می‌شود تا این‌که در نهایت پس از گذر 160 دقیقه از زمان تخمیر اتصالاتی میان برخی حفرات دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در این بخش نیز توزیع حفرات بیش‌تر در بخش قاعده خمیر است تا رو به رأس آن و البته این‌که روند رشد و توزیع از قاعده خمیر رو به بالا است.

در ارتباط با مقاطع مرکزی باید گفت که در اولین زمان ساختار متخلخل پیوسته و مترکمی در قاعده خمیر روی می‌شود. سپس در زمان دوم سطح متخلخل در قاعده تا حدی نسبت به سطح متخلخل زمان اول کوچک‌تر شده ضمن آن‌که حفرات پراکنده بالای ساختار متخلخل گویای آغاز تشکیل ساختار متخلخل در نواحی بالایی و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید برخلاف جاذبه، به سمت بالا است. در واقع برخلاف بسیاری از سیستم‌های فوم به خاطر مودولوس ویسکوالاستیک فاز توده که به اندازه کافی در خمیر نان بالاست، به حباب‌ها اجازه حرکت به سمت بالا برخلاف نیروی جاذبه را نمی‌دهد [21]؛ این خود دلیلی است بر وجود ساختار متخلخل در بخش پایین خمیر. تصاویر مربوط به سومین زمان نشانگر آن است که باز هم از میزان تخلخل کاسته شده و هم‌چنان تمرکز ساختار متخلخل در قاعده خمیر است. در نهایت تصویر مقطع چهارمین زمان، ساختار متخلخل توسعه یافته‌ای را نمایش می‌دهد که تخلخل نواحی بالایی و پایینی خمیر را فرا گرفته و البته ساختار کاملاً پیوسته بوده که نشان‌دهنده آن است که هرچند ساختار متخلخل در ابتدا در قاعده تشکیل یافته است و سپس در بالای خمیر، ولیکن در نهایت هر دو بخش به هم می‌پیوندند و یکدست می‌شوند. البته نکته دیگری که از تصویر برداشت می‌شود آن است که تمامی نواحی مجاور پوسته خمیر خالی از حفره و فاقد ساختار متخلخل دیده می‌شود. با در نظر گرفتن شیب تند و افزایش یافته‌ای که در نمودار تخلخل مقاطع دیده شد، وجود این ساختار متخلخل وسیع قابل توجیه است. از سویی با توجه به نمودار تخلخل-زمان هرچند شیب نمودار نسبت به بخش قبلی تا حدی کاهش یافته است ولیکن محدوده تغییرات تخلخل در بخش دوم نمودار از زمان سوم به چهارم به ازای هر واحد زمان افزایش یافته و در نهایت شدت تخلخل بسیار

سه زمان اول و بخش دوم تغییرات زمان سوم به چهارم را نشان می‌دهد. شیب تغییرات تخلخل در بین دو بخش متفاوت بوده و در هر دو مورد شیب بخش دوم نسبت به اول کاهش یافته است. این بدین معناست که عامل پدیده گسترش تخلخل در کل خمیر موجود بوده و در همه جا رخ می‌دهد اما با توجه به کم‌تر بودن شدت تخلخل در جوانب می‌توان گفت که هرچند گسترش تخلخل در کل خمیر رخ می‌دهد، اما شدت رخداد این پدیده یکنواخت نبوده و در بخش مرکزی با شدت بیش‌تری وقوع می‌یابد. تفاوت در شیب دو نمودار حاکی از آن است که شدت تغییرات تخلخل در مرکز از جانب بیش‌تر است.

### 3-5- بررسی توزیع تخلخل در یک مقطع خمیر

تصاویر موجود در کنار نمودارهای شکل (8)، وضعیت توزیع تخلخل در یک مقطع خمیر را به خوبی نشان می‌دهند. در واقع تصاویر گویای آن است که در مقاطع جانبی زمان 35 دقیقه، ساختار متخلخل تشکیل نشده که سه فرضیه قابل طرح می‌باشد: (1) احتمالاً تا این زمان گاز کربن‌دی‌اکسید هنوز به میزان کافی به منظور ایجاد تخلخل تشکیل نشده است. (2) از سویی گاز تولیدی وارد فاز آبی شده و هنوز اشباع نشده است که به تشکیل ساختار متخلخل برسد. (3) هسته‌های هوا به صورت پراکنده و منفصل در سطح خمیر پراکنده‌اند، لذا هنوز ساختار متخلخل تشکیل نیافته است. بر مبنای میکروگراف‌های الکترونی تهیه شده از خمیر در حال تخمیر در یک مرحله مشخص، ماتریکس گلوتن-نشاسته احاطه‌کننده حباب‌های گاز ممکن است منفصل گردد، اما هنوز حباب‌های گاز به رشد ادامه دهند. این پدیده به وسیله حضور لایه مایع که سلول‌های گاز را پوشش‌دهی کرده و تثبیت و پایدار می‌کنند توضیح داده می‌شود. بنابراین حباب‌های گاز در یک خمیر در حال انبساط با دو مکانیسم پایدار می‌شوند. مکانیسم اول مربوط به ماتریکس گلوتن-نشاسته و دوم لایه مایع پوشش‌دهنده حباب‌ها است. مکانیسم اول در همه مراحل انبساط عمل می‌کند ولی دومی به مراحل اولیه انبساط مربوط نیست و وقتی که حباب‌ها اولین بار در تماس با یکدیگر واقع می‌شوند اهمیت می‌یابد [22]. بنابراین عدم وجود ساختار متخلخل کامل و منسجم در مراحل ابتدایی تخمیر با وجود چنین پیش‌فرضی قابل قبول است. در

تخلخل در راستای زمان در دو فاز صورت گرفت: فاز تند اولیه و فاز کند ثانویه. در فاز اول ساختار متخلخل در حال شکل‌گیری بوده و در فاز دوم ساختار رشد و گسترش یافته و ثبات پیدا کرده است. میزان و پیوستگی توزیع تخلخل در مقاطع مرکزی بیش‌تر از بخش‌های میانی و جانبی بود. در حقیقت توزیع تخلخل در نزدیکی پوسته خمیر در حداقل بوده، با نزدیک شدن به سمت مرکز افزایش یافته و در مرکز خمیر به حداکثر خود رسید. تغییرات توزیع تخلخل در مقاطع جانبی و میانی با شیب کمی تغییر کرده در حالی که در مقطع مرکزی میزان تخلخل با اختلاف زیادی از این دو افزایش یافته است. توزیع حفرات در هر مقطع، بیش‌تر در بخش قاعده خمیر متمرکز بود. با توجه به عکس‌های حاصل، همواره روند رشد و توزیع تخلخل از قاعده خمیر رو به بالا بود. با این حال در نهایت هر دو بخش متخلخل یعنی بخش‌های قاعده و رأس خمیر، به هم پیوسته و ساختار متخلخل یکدستی حاصل گشت. یافته‌های حاصل از این پژوهش سیر تغییرات میزان کمی تخلخل بافت خمیر را در راستای زمان تخمیر و نیز محل توزیع حفرات تبیین نمود. ضمن آن که الگوی مناسبی برای نحوه توزیع تخلخل از نظر کیفی در هر مقطع خمیر ارائه کرد. با در نظر گرفتن نتایج پژوهش حاضر، استفاده از دستگاه سی‌تی‌اسکن و روش پردازش تصویر جهت بررسی توزیع تخلخل در بافت خمیر نان می‌تواند به‌عنوان یک روش علمی و دقیق به‌کار گرفته شود.

بالاتر است. محققان با بررسی تصاویر سی‌تی‌اسکن قطعه‌های خمیر در حال تخمیر درون یک قالب، نشان دادند که در نیمه پایین‌تر خمیر نسبت به بخش بالاتر آن انبساط عظیم‌تری وجود دارد. آن‌ها علت رخداد این پدیده را این‌طور بیان کردند که در مراحل ابتدایی تخمیر حرارت هدایت یافته از دیواره‌های قالب سریعاً به قطعه خمیر می‌رسد. هنگامی که قطعه خمیر شروع به پر کردن قالب می‌کند، انتقال حرارت به مرکز خمیر آهسته است، ولیکن فشار گاز تولیدشده توسط نواحی در حال تخمیر، به سرعت مرکز خمیر را به بالا انتقال می‌دهد. لذا در انتهای تخمیر مرکز اصلی قطعه خمیر در حدود دو سوم راه را به بالای قالب آمده است [21].

#### 4- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف محاسبه کمی و کیفی توزیع تخلخل در راستای زمان تخمیر و مکان مقطع مورد بررسی در خمیر یعنی مقاطع جانبی، میانی و مرکزی و نیز دستیابی به الگوی پراکندگی تخلخل در هر مقطع خمیر صورت گرفت. از طریق پیاده‌سازی تکنیک‌های پردازش تصویر بر عکس‌های حاصل از سی‌تی‌اسکن، توزیع کمی و کیفی تخلخل بافت خمیر به‌دست آمد و نتایج نهایی قابل تفسیر و مقایسه بودند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که تغییرات تخلخل در طی سپری شدن زمان تخمیر، شیب صعودی داشته و رو به افزایش بود. تغییرات

#### منابع

- dough. *Food Bioprod. Process.*, 81, 189-193.
- [5] Rahman, M.S. (2002). Formation of pores in foods during drying and frying: A theoretical model. In: *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Food Rheology and Structure*.
- [6] Rahman, M.S. (2001). Toward prediction of porosity in food during drying: A brief review. *Drying Technol.*, 19, 1-13.
- [7] خلیلیان، ص؛ ضیایی‌فر، ا. م؛ (1393) ساختارهای متخلخل در مواد غذایی: بررسی انواع تخلخل، مکانیسم‌ها و
- [1] Pomeranz, Y. (1988). *Wheat: Chemistry and Technology*, 3<sup>rd</sup> ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul. MN..
- [2] Cauvain, S. P. Young, L. S. (2007). *Technology of Breadmaking*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer, Bake Tran.
- [3] Gan, Z., Ellis, P. R., Schofield, J. D. (1995). Gas cell stabilisation and gas retention in wheat bread dough. *J. Cereal Sci.*, 21, 215-230.
- [4] Mills, E. N. C., Wilde, P. J., Salt, L. J., Skeggs, P. (2003). Bubble formation and stabilization in bread

- ray tomography, dough density and population balance modelling. *Chem. Eng. Sci.*, 101, 470-477.
- [16] Whitworth, M. B., Alava, J. M. (1999). The imaging and measurement of bubbles in bread doughs. *Bubbles in Food.*, 221-231.
- [17] Romano, A., Cavella, S., Toraldo, G., Masi, P. (2013). 2D structural imaging study of bubble evolution during leavening. *Food Res Int.*, 50, 324-329.
- [18] Zheng, C., Sun, D. W., Zheng, L. (2006). Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection—a review. *Trends in Food Sci. Technol.*, 17, 642-655.
- [19] Chanona-Pérez, J., Quevedo, R., Aparicio, A. J., Chávez, C. G., Pérez, J. M., Domínguez, G. C., Gutiérrez-López, G. F. (2008). Image processing methods and fractal analysis for quantitative evaluation of size, shape, structure and microstructure in food materials. In: *Food Engineering: Integrated Approaches* (pp. 277-286). Springer New York.
- [20] Haralick, R. M., Shanmugam, K. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Trans. Sys, Man, Cybern.*, 3, 610-621.
- [21] MacRitchie, F. (2010). *Concepts in Cereal Chemistry*. CRC Press, New York.
- [22] Sroan, B. S., Bean, S. R., MacRitchie, F. (2009). Mechanism of gas cell stabilization in bread making. I. The primary gluten–starch matrix. *J. Cereal Sci.*, 49, 32-40.
- تحلیل رفتارهای حاکم در پدیده‌های انتقال حرارت و جرم. اولین همایش ملی میان وعده‌های غذایی، مشهد.
- [8] ناظری، ف. ا. (1395) طراحی و ساخت سامانه پایش مداوم و همزمان فشار، دما و سایر ویژگی‌های فیزیکی خمیر نان طی تخمیر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی.
- [9] Goetz, J., Grob, D., Koehler, P., (2003). On-line observation of dough fermentation by magnetic resonance imaging and volumetric measurements. *Eur. Food Res. Technol.*, 217, 504-511.
- [10] Bajd, F. Sersa, I. (2011). Continuous monitoring of dough fermentation and bread baking by magnetic resonance microscopy. *J. Magn. Reson.*, 29, 434-442.
- [11] Schoeman, L., Williams, P., Plessis, A., Manley, M. (2016). X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) for non-destructive characterisation of food microstructure. *Trend. Food Sci. Technol.*, 47, 10-24.
- [12] Babin, P., Della Valle, G., Chiron, H., Cloetens, P., Hozzowska, J., Pernot, P., Dendievel, R. (2006). Fast X-ray tomography analysis of bubble growth and foam setting during breadmaking. *J. Cereal Sci.*, 43, 393-397.
- [13] Babin, P., Della Valle, G., Chiron, H., Cloetens, P., Hozzowska, J., Pernot, P., Dendievel, R. (2008). In situ fast X-ray tomography study of the evolution of cellular structure in bread dough during proving and baking. *Bubbles in Food.*, 2, 265-272.
- [14] Turbin-Orger, A., Boller, E., Chaunier, L., Chiron, H., Della Valle, G., Reguerre, A. L. (2012). Kinetics of bubble growth in wheat flour dough during proofing studied by computed X-ray micro-tomography. *J. Cereal Sci.*, 56, 676-683.
- [15] Trinh, L., Lowe, T., Campbell, G. M., Withers, P. J., Martin, P. J. (2013). Bread dough aeration dynamics during pressure step-change mixing: Studies by X-