

### Research Article

## Development of a non-destructive method to determine the textural characteristics of baguette bread using a Doppler laser vibrometer sensor

Saman Abdanan Mehdizadeh<sup>1\*</sup>, Seyedeh Fatemeh Nouri<sup>2</sup>

1. Associate professor, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

2. MSc Student, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

(Received 12 July 2022, Received in revised form 2 September 2022, Accepted 28 October 2022)

### Abstract

Finding a nondestructive method, for rapid evaluation of bread crumb changes during storage, helps researchers to assess the effect of different additives on quality properties and shelf life of bread. Therefore, in this study the changes of bread free vibrational parameters including natural frequency, damping ration, zero-crossing rate, average, standard deviation, peak, energy and entropy were evaluated in comparison with bread textural and sensorial properties on 0, 2 and 4 storage days. Finally, a predictive model was developed to determine the textural characteristics of bread (firmness, chewiness, cohesiveness and springiness) using support vector regression with three kernels linear, quadratic and radial basis function. Results of correlation coefficient of evaluation showed strong relationship between vibrational parameters with textural variables. In addition, in general, considering the error of three kernels as well as the correlation coefficient, the linear kernel performed better than the other two kernels in predicting textural characteristics. Therefore, the results of this study demonstrated the suitability of vibrational properties for determination of textural characteristics of bread crumb during storage.

**Key words:** bread staling, textural characteristics, vibrational parameters, correlation analysis

### How to cite this article:

Abdanan Mehdizadeh, S., Nouri, F., (2022). Development of a non-destructive method to determine the textural characteristics of baguette bread using a Doppler laser vibrometer sensor. *Innov. Food Technol.*, 10(1), 69-85.

\* Corresponding author: [s.abdanan@asnrukh.ac.ir](mailto:s.abdanan@asnrukh.ac.ir)

### مقاله پژوهشی

## توسعه یک روش غیر مخرب به‌منظور تعیین ویژگی‌های بافتی نان باگت با استفاده از سنسور ارتعاش سنج لیزر داپلر

سامان آبدانان مهدی‌زاده<sup>۱\*</sup>، سیده فاطمه نوری<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶)

### چکیده

یافتن روشی غیرمخرب برای ارزیابی سریع تغییرات بافت نان طی مدت نگهداری کمک شایانی به پژوهشگران برای بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر ویژگی‌های کیفی و ماندگاری نان می‌کند. در این راستا، در این پژوهش تغییرات پارامترهای ارتعاش آزاد شامل فرکانس طبیعی، نسب میرایی، تعداد عبور از نقطه صفر، میانگین، انحراف معیار، اوج، انرژی شدت ارتعاش و آنتروپی در مقایسه با ویژگی‌های بافتی و حسی نمونه‌های نان در روزهای صفر، دوم و چهارم نگهداری مورد بررسی قرار گرفتند. نهایتاً با ویژگی‌ها به‌دست‌آمده مدل پیشگویی برای تعیین ویژگی‌های بافتی نان (سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعی) به کمک رگرسیون ماشین بردار پشتیبان با ۳ کرنل خطی، درجه دو و کرنل تابع پایه شعاعی توسعه یافت. نتایج ارزیابی ضریب همبستگی نشان دهنده وجود ارتباط قوی بین پارامترهای ارتعاشی و متغیرهای بافتی بود. بعلاوه در حالت کلی با توجه به خطای سه کرنل و همچنین ضریب همبستگی به‌دست‌آمده کرنل خطی در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی عملکرد بهتری نسب به دو کرنل دیگر داشت. لذا روش توسعه‌یافته با توجه به دقت بالا امکان جایگزینی روش مخرب آزمون بافت را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** بیاتی نان، متغیرهای بافتی، پارامترهای ارتعاشی، آنالیز همبستگی



## ۱. مقدمه

کیفیت و ایمنی بالا در محصولات غذایی و کشاورزی از مواردی هستند که برای مصرف‌کننده از اهمیت بسزایی برخوردار هستند، بنابراین صنایع غذایی بر ارائه محصولات بی‌ضرر و با کیفیت که نیاز اصلی بازار است، متمرکز شده است و به دنبال فناوری‌های سریع و دقیق برای ارزیابی و تشخیص کیفیت می‌باشد [۱]. این امر سبب توسعه روش‌های زیادی برای کنترل دقیق ویژگی‌های محصولات غذایی و کشاورزی شده است. با این حال اکثر روش‌های موجود برای شناسایی ویژگی مواد، زمان‌بر و مخرب هستند، بنابراین ارائه تکنیک‌های غیر مخرب و سریع برای ارزیابی و کنترل کیفیت و ایمنی مواد غذایی امری مهم به شمار می‌رود [۲]. ایمنی غذا نشان می‌دهد که مواد غذایی عاری از سموم و آلاینده‌هایی است که برای سلامتی انسان مضر هستند؛ ارزش غذایی محصولات و همچنین ظاهر آن‌ها مانند بافت خوب، از مواردی هستند که موردپسند مصرف‌کننده می‌باشند [۳]. در این میان نان از جمله محصولاتی است که بافت آن از اهمیت و ضرورت ویژه‌ای در پذیرش مصرف‌کنندگان برخوردار است. بافت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی نان است که به‌عنوان مجموعه‌ای از خواص مکانیکی و ساختاری تعریف می‌شود. طی نگهداری نان، ساختار بلوری نشاسته کم‌کم و در مقیاس محدود برگشت پیدا می‌کند که این فرایند به رتروگراداسیون نشاسته معروف است. در این فرایند پیچیده، زنجیره‌های آمیلوز که در اثر ژلاتینه شدن، محلول شده‌اند، در اثر سرد شدن، تجمع می‌یابند و یک ساختار بلوری سه بعدی را تشکیل می‌دهند. فرایند رتروگراداسیون آمیلوز کوتاه است، اما رتروگراداسیون آمیلوپکتین به زمان طولانی‌تر (چند روز تا چند هفته) نیاز دارد. این فرایند از آنجا که موجب تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حسی نان می‌شود، از نظر تکنولوژیکی نان و به‌ویژه بیاتی حائز اهمیت است [۴]. طی نگهداری نان، آب از بافت درونی به پوسته مهاجرت می‌کند که سبب کاهش رطوبت بافت درونی نان می‌گردد. به این ترتیب،

محتوای رطوبت موضعی شبکه گلوتن می‌تواند به زیر نقطه بحرانی آن برای پلاستیک ماندن کامل، افت نماید. در نتیجه سفت شدن شبکه گلوتن، سفتی مغز نان<sup>۱</sup> طی دوره نگهداری افزایش می‌یابد [۵]. تغییرات فیزیکی‌شیمیایی به وجود آمده طی نگهداری نان از جمله سفت شدن بافت درونی، تغییر در طعم و افت تردی، بخشی از یک فرایند کلی که بیاتی نامیده می‌شود را شامل می‌گردد. این تغییرات سبب افت ویژگی‌های حسی محصول شده که در پذیرش مصرف‌کننده اثر منفی خواهد گذاشت، هرچند ممکن است این فرآورده هنوز سالم باشد [۶].

بیات شدن نان یک اصطلاح کلی است که به پدیده سفت شدن مغز نان، نرم شدن پوسته و بدتر شدن طعم نان در طی نگهداری آن اشاره دارد [۷]. ویژگی مکانیکی بافت مانند سفتی مغز نان، از شاخص‌های دیگر برای اندازه‌گیری بیاتی نان می‌باشد [۸]، که اخیراً با استفاده از تجزیه و تحلیل تصاویر پیکسلی بافت، که به‌عنوان یک روش غیرمخرب و سریع برای ارزیابی، پیش‌بینی و طبقه‌بندی کیفیت محصولات غذایی مورد توجه قرار گرفته است [۹]. به‌طور کلی ارزیابی سفتی بافت یک پارامتر مناسب برای ارزیابی توسعه بیاتی نان است. پژوهش‌های زیادی طی دهه‌های گذشته به‌منظور تحقیق در مورد مکانیسم‌های بیاتی نان و همچنین روش‌هایی برای تعیین سرعت بیاتی، انجام شده است [۸]. روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری سفتی بافت درونی نان در دسترس است. به‌عنوان مثال انجمن شیمی غلات آمریکا (AACC) یک روش استاندارد بر اساس آزمون فشار<sup>۲</sup> یک قطعه از مغز نان با ضخامت ۲۰ mm ارائه نموده است [۱۰]. بافت مغز نان اغلب تحت عنوان نیروی اندازه‌گیری شده برحسب نیوتن در یک نسبت فشرده‌سازی انتخابی (به‌عنوان مثال، ۲۵٪) تعیین می‌شود. هنگامی که پروب دستگاه در تماس با بافت درونی نان قرار می‌گیرد، با استفاده از افزایش

1. Crumb firmness

2. Compression

نگهداری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق روش آگرینوز<sup>۳</sup> را برای تشخیص رشد قارچ نان در شرایط بی‌هوای دقیق و غیرمخرب گزارش کردند [۱۵]. در پژوهش دیگری، زی و همکاران (۲۰۰۳)، تغییرات نان گندم در انبارمانی، توسط تحلیلگر بافت (TA<sup>۴</sup>) و طیف‌سنجی انعکاسی مادون قرمز نزدیک (NIRS<sup>۵</sup>) طی ۵ روز مورد بررسی نمودند. در این تحقیق همبستگی بالایی بین NIRS و TA گزارش شد که NIRS توانایی اندازه‌گیری بیانی نان را با دقت مناسب‌تر و بر اساس فیزیکوشیمیایی طی نگهداری را دارد و نسبت به TA که فقط سفتی را بررسی می‌کند عملکرد بهتری دارد [۱۶].

از دیگر روش‌های ارزیابی محصولات غذایی می‌توان به آزمون‌های ارتعاشی با توجه به ماهیت غیر مخرب آن اشاره نمود. از این روش در تعیین ویژگی‌های کیفی مواد غذایی به‌صورت گسترده استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. استفاده از آزمون‌های مکانیکی و همچنین اندازه‌گیری ارتعاشی به‌صورت همزمان اطلاعات بیشتری از ساختار بافت را در مقایسه با روش بافت‌سنجی ارائه می‌دهند [۱۸]. کارسانبار و همکاران (۲۰۱۸) تردی و فیرفهای مختلف را با آزمون ارتعاشی - مکانیکی بررسی کردند؛ بر اساس نتایج مشخص گردید که هر دو روش ارتعاشی و مکانیکی به روش‌های مختلف می‌توانند کیفیت محصول را بررسی کنند. توصیف‌کننده حس "تردی" با ناحیه زیرمنحنی جابجایی ( $r = 0.76$ ) و میانگین مقدار ارتعاش ( $r = 0.59$ ) همبستگی داشت [۱۹]. همچنین در پژوهشی که توسط تانیواکی و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد، یک روش ارتعاشی غیر مخرب به‌وسیله ارتعاش‌سنج داپلر لیزری برای ارزیابی تغییرات الاستیسیته نمونه‌های هندوانه بکار گرفته شد [۲۰]. در پژوهشی دیگر، از یک روش ارتعاش‌سنجی برای توسعه ارزیابی رفتار رسیدگی و عمر انبارمانی میوه هلو در دوره‌های انبارمانی گوناگون

نیرو، درصد تغییر شکل تعیین می‌گردد. در این روش ممکن است یک خطا در تعیین درصد تغییر شکل به وجود آید. برای مثال، اگر قطعه‌های حاصل از مغز نان کاملاً صاف نباشند، ممکن است نیرو قبل از فشردن‌سازی مؤثر این قطعه‌ها بالا رود؛ این امر منجر به ایجاد خطا در تعیین نیروی لازم برای فشردن‌سازی می‌شود. بنابراین حداقل ۳ الی ۶ تکرار بایستی انجام شود تا یک داده از بافت درونی نان به دست آید. مشکل دیگر این است، از آنجا که برای آزمون‌های آزمایشگاهی از نان‌های کوچک استفاده می‌شود، در این گونه موارد تعداد قطعه‌های مورد نیاز از یک نان برای آزمون خیلی زیاد نمی‌باشد. همچنین در برخی موارد مغز نان می‌تواند دارای سلول‌های بزرگ (به عنوان مثال در مورد نان باگت) به‌اندازه ضخامت قطعه تحت آزمون باشد. در این گونه موارد نیز ممکن است آزمون فشردن‌سازی با خطا همراه شود [۱۱]. بدین منظور پژوهشگران همواره به دنبال روش‌های جایگزین برای روش‌های سنتی ارزیابی کیفیت محصولات غذایی بوده‌اند.

در پژوهشی نوری و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از پردازش تصاویر بافت، بیات شدن نان را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های بافتی استخراج‌شده از تصاویر، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی پیشرفت بیاتی نان هستند [۱۲]. لیوا-والنزیولا و همکاران (۲۰۱۹) یک روش پردازش تصویر را برای پیش‌بینی محتوای فوران<sup>۱</sup> در خمیر سرخ‌شده توسعه دادند. بر اساس نتایج ضریب همبستگی مناسبی میان پیش-بینی محتوای فوران با استفاده از ویژگی‌های رنگی تصاویر  $R = 0.89$  به دست آمد [۱۳]. پولاک و همکاران (۲۰۱۹)، تصویربرداری فراطیفی را برای پیش‌بینی رطوبت و سفتی یک استفاده کردند. نتایج آن‌ها از توانایی تصویربرداری فراطیفی در ارزیابی کیفیت کیک در زمان واقعی را نشان می‌دهد [۱۴]. روساینک و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از بینی الکترونیکی<sup>۲</sup> بوی ایجادشده از نان گندم را طی ۴ روز

3. Agrinose  
4. Texture Analyzer  
5. Near-infrared Reflectance Spectroscopy

1. Furan  
2. Nose Electronic

انجام تخمیر، به چانه‌های ۱۰۰ g تقسیم و به مدت ۳۰ دقیقه دیگر در دمای °C ۳۵ تا °C ۳۸ برای تخمیر میانی قرار گرفت، در مرحله بعدی چانه‌ها به صورت لوله‌ای درآمده و ۲۰ min تخمیر نهایی شدند. در نهایت نیز پخت به مدت ۱۵ min در فر با دمای °C ۲۵۰ انجام شد. نان‌های حاصل پس از سرد شدن در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شدند. لازم به ذکر است که پخت نان در کارگاه نخل طلایی واقع در شهر اهواز انجام پذیرفت.

## ۲.۲. بیاتی

در این پژوهش برای ارزیابی روند بیاتی نان باگت، از بررسی تغییرات رخ داده در ویژگی‌های فیزیکی، حسی و ارتعاشی نمونه‌ها در روزهای صفر، دوم و چهارم نگهداری در دمای اتاق، استفاده گردید.

### ۱.۲.۲. جرم و محتوی رطوبت

جرم نمونه‌ها در روزهای صفر، دوم و چهارم انبارمانی اندازه‌گیری و به صورت گرم ثبت گردید. محتوی رطوبت پوسته و بافت درونی نمونه‌ها در روزهای تعیین شده با استفاده از روش گراویمتری تعیین شد. نمونه‌ها توسط آون و در دمای °C ۱۰۵ خشک گردید. محتوی رطوبت به صورت گرم آب بر گرم نمونه مرطوب (g/۱۰۰ نمونه/گرم آب) بیان گردید [۲۳]. همه اندازه‌گیری‌ها در ۶ تکرار انجام شد.

### ۲.۲.۲. بافت

سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت بافت درونی نان با استفاده از دستگاه بافت‌سنج (TA.XT2i Stable) (Micro Systems, Goldalming, UK) تجهیز شده با یک بارسنج ۷ kg و پروب استوانه‌ای (قطر 36 mm)، اندازه‌گیری شد [۲۲]. اندازه‌گیری‌ها در روزهای صفر، دوم و چهارم بعد از پخت نان انجام گردید. در هر روز نمونه‌های مورد بررسی را

استفاده گردید [۲۱]. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که روش‌های ارتعاش‌سنجی می‌توانند به عنوان روش‌هایی غیر مخرب، برای ارزیابی تغییرات بافتی در محصولات غذایی بکار گرفته شوند.

بیاتی نان فرایند پیچیده‌ای همراه با تغییرات نامطلوبی است که سبب عدم پذیرش فرآورده از جانب مصرف‌کننده می‌شود. بدیهی‌ترین تغییرات به وجود آمده در نان طی مدت زمان نگهداری، تغییر در محتوی رطوبت و ویژگی‌های بافتی آن می‌باشد. این پدیده را نمی‌توان ناشی از یک اثر منفرد دانست، رتروگراداسیون آمیلوز و آمیلوپکتین<sup>۱</sup>، سازماندهی مجدد پلیمرها درون ناحیه آمورف<sup>۲</sup>، در کاهش محتوی رطوبت بخش درونی، و در افزایش محتوی رطوبت پوسته، توزیع محتوی رطوبت بین ناحیه آمورف و کریستالی و تغییر در ساختار ماکروسکوپی در فرایند بیاتی شرکت می‌کنند [۲۲]. با توجه به مطالعات انجام شده و کاربردهای اخیر فناوری‌های نوین مختلف و غیرمخرب برای ارزیابی محصولات غذایی و کشاورزی هدف این تحقیق توسعه یک روش غیرمخرب به منظور تعیین ویژگی‌های بافتی (سفتی<sup>۳</sup>، قابلیت جویدن<sup>۴</sup>، پیوستگی<sup>۵</sup> و ارتجاعیت<sup>۶</sup>) و همچنین بیاتی نان با استفاده از سنسور ارتعاش‌سنج داپلر در نظر گرفته شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. تهیه نان باگت

برای تهیه نان باگت، آرد گندم، شکر ۱٪، نمک ۱٪، مخمر ۱/۱۵٪، بهبوددهنده ۱/۱۵٪ و آب ۵۰٪ مقدار وزنی آرد باهم مخلوط شدند، سپس خمیر فوق به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق (۲۵°C) به منظور انجام عمل تخمیر قرار داده شد. بعد از

1. Amylopectin retrogradation
2. Amorphous region
3. Firmness
4. chewiness
5. Cohesiveness
6. Springiness

7. Load cell

آزمون پس از ارائه آموزش، از ارزیاب‌ها (۱۵ نفر از دانشجویان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان) خواسته شد که پذیرش یا عدم پذیرش خود را نسبت به نمونه‌ها، با پاسخ آری (پذیرش) و خیر (عدم پذیرش) ثبت نمایند. پس از دوره نگهداری نمودار عدم پذیرش مصرف‌کننده<sup>۱</sup> در مقابل مدت زمان نگهداری رسم گردید.

#### ۴.۲.۲. ویژگی‌های ارتعاشی

به‌منظور ارزیابی ارتعاشات مکانیکی نان در خلال انبارمانی از حسگر حرکتی میکروویو HB100 که یک ماژول فرستنده-گیرنده دابلر X-Band Bi-Static می‌باشد، استفاده گردید. در این حسگر، یک نوسان‌ساز تشدیدکننده عایق (DRO) تعبیه‌شده و شامل یک جفت آنتن Microstrip patch می‌باشد. تشخیص حرکت در این حسگر بدین ترتیب است که ابتدا امواج میکروویو را ارسال نموده و سپس تفاوت بین فرکانس موج فرستاده‌شده را با فرکانس موج دریافت‌شده را اندازه‌گیری می‌کند. این اختلاف فرکانس، با سرعت حرکت جسمی که تشخیص داده است، نسبت مستقیم دارد. شکل (۱) مدار الکتریکی راه‌انداز حسگر را نشان می‌دهد. به‌طور متوسط ۲۰۰۰ داده ارتعاشی در هر ثانیه در طول آزمایش ثبت و به محیط MATLAB منتقل شد.

به‌صورت عرضی برش داده و از هر نان ۳ قطعه (با ضخامت ۲۵ mm) برای این آزمون انتخاب گردید. طی اندازه‌گیری، پروب دستگاه قطعه نان برش داده‌شده را با سرعت آزمون ۱/۷ mm/s، تا ۴۰٪ فشرده و ۳۲ s در این موقعیت باقی ماند. سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت با استفاده از نرم‌افزار (Texture Exponent Stable) version 5.1.1.0, (Microsystems, Godalming, UK) و از طریق روابط (۱) تا (۴) محاسبه شدند [۲۵،۲۴]:

$$F_1 = \text{سفتی} \quad (۱)$$

$$\text{قابلیت جویدن} = F_1 \times (T_2/T_1) \times (A_2/A_1) \quad (۲)$$

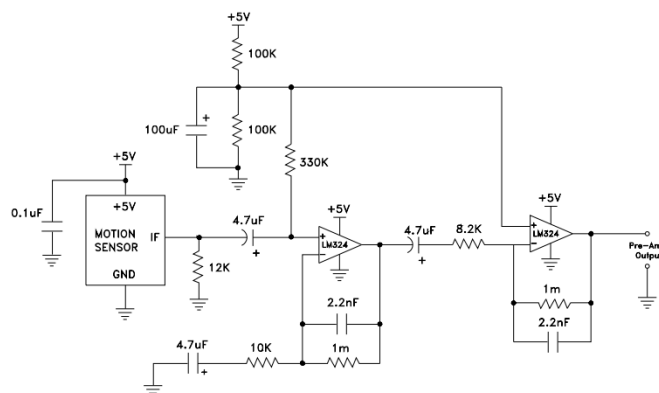
$$\text{پیوستگی} = (A_2/A_1) \times 100 \quad (۳)$$

$$\text{ارتجاعیت} = (T_2/T_1) \times 100 \quad (۴)$$

که در آن  $F_1$  حداکثر نیروی مشاهده‌شده،  $A_2$  و  $A_1$  ناحیه‌های زیر منحنی بارگذاری مرحله اول و دوم و  $T_2$  و  $T_1$  به ترتیب زمان‌های سپری‌شده تا رسیدن به قله‌های اول و دوم در دو سیکل بارگذاری می‌باشند.

#### ۳.۲.۲. ارزیابی حسی

طی مدت زمان نگهداری ارزیابی حسی با روش مورد استفاده توسط باگزولی و همکاران (۲۰۰۸) انجام شد [۲۶]. در این



شکل (۱): شماتیک مدار الکترونیکی اندازه‌گیری داده‌های ارتعاشی.

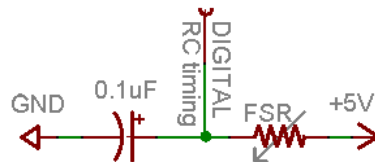
Fig 1. Schematic of electronic circuit for measuring vibration data.

به دست می‌آمد که به‌منظور مستقل‌سازی از بزرگی نیروی اعمالی بر خروجی حسگر حرکتی تقسیم گردید. شکل (۲) چکش تحریک‌کننده (۲-الف) و مدار الکتریکی (۲-ب) را نمایش می‌دهد.



(الف)

نمونه‌ها بعد از قرارگیری در بستر خود (به‌صورت تیر یک سر درگیر) به‌وسیله چکش چوبی سبک مجهز به حسگر FSR با اعمال ضربه تحریک شدند. دلیل قرار دادن این سنسور تعیین نیروی ضربه و عدم آسیب مکانیکی به نمونه‌ها در هر بار اندازه‌گیری بود. خروجی حسگر FSR بر حسب میلی ولتاژ



(ب)

شکل (۲) الف) چکش تحریک‌کننده به همراه حسگر FSR و ب) مدار الکتریکی راه‌انداز.

Fig 2. a: Excitation hammer with the FSR sensor & b: Starter electrical circuit.

در این رابطه  $x_i$  و  $y_i$  اندازه‌گیری متغیر  $X$  و  $Y$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )، و همچنین  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین‌های نمونه  $X$  و  $Y$  می‌باشند.

#### ۴.۲. توسعه مدل پیشگو

بعد از استخراج ویژگی‌های ارتعاشی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های بافت نان به‌صورت غیر مخرب از روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR) استفاده گردید [۲۸]. بدین منظور مدل رگرسیون از زوج مقادیر بردار ورودی و خروجی آموزش یافت. عملکرد تابع توسعه‌یافته با MAPE (درصد میانگین خطا مطلق) و RMSE (مجذور میانگین مربعات خطا) ارزیابی گردید (رابطه ۶):

$$RMSE(S, f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(f(x_i) - y_i)^2}{y_i}} \quad (6)$$

به‌منظور توسعه مدل از کرنل‌های مختلفی مانند تابع کرنل خطی، درجه دو و کرنل تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده می‌گردد. لذا در این پژوهش از این کرنل با توجه به موفقیت آن در کاربردهای مختلف و همچنین توانایی این

این آزمایش ۴ بار برای هر نمونه تکرار و میانگین به‌دست‌آمده از این ۴ تکرار ثبت گردید. سپس با استفاده از روش کاهش لگاریتمی نسبت میرایی نمونه‌ها و تعداد عبور از نقطه صفر، میانگین و انحراف معیار، اوج و انرژی شدت ارتعاش در حوزه زمان و فرکانس طبیعی و آنتروپی از حوزه فرکانس استخراج شدند [۲۷].

#### ۳.۲. آنالیز همبستگی

آنالیز همبستگی<sup>۱</sup>، نوع و میزان رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد. در این مطالعه، ارتباط بین پارامترهای ارتعاشی و متغیرهای بافتی با استفاده از مقادیر ضریب همبستگی ( $r$ )، که مقیاسی از رابطه خطی بین دو متغیر است مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب همبستگی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

1. Correlation analysis

کنرل‌ها در مدل‌سازی مسائل غیرخطی استفاده گردید [۲۹]. در این پژوهش تعداد ۱۰۰ عدد نان برای توسعه مدل مورد بهره گرفته شد به طوری که دو-سوم آنها برای آموزش و یک-سوم آن‌ها برای آزمون استفاده شدند.

## ۵.۲. آنالیز آماری

برای بررسی داده‌های به دست آمده از طرح کاملاً تصادفی و آنالیز واریانس (ANOVA) و در ۶ تکرار برای اندازه‌گیری‌های ارتعاش سنجی و بافت سنجی استفاده گردید. همچنین برای مقایسه میانگین‌ها، آزمون چند دامنه‌ای دانکن ( $\alpha=0/05$ ) بکار گرفته شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام گردید.

## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳. جرم و محتوی رطوبت

همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، جرم نمونه‌ها طی مدت زمان نگهداری کاهش پیدا نمود. میانگین جرم نمونه‌ها در روزهای صفر، دوم و چهارم نگهداری روندی کاهشی داشت. در حالی که این روند برای پوسته عکس و افزایشی بود. این بدین معنی است که طی مدت زمان

جدول (۱) تأثیر مدت زمان نگهداری بر جرم، محتوی رطوبت درون و پوسته، سفتی و ارتجاعیت نان.

Table 1. The effect of storage time on mass, moisture content inside and crust, firmness and springiness

زمان (روز) Time (day)	پارامتر اندازه گیری شده Measured Parameters						ارتجاعیت (%) Springiness (%)
	جرم (g) Mass (g)	رطوبت مغز (%) Crumb moisture (%)	رطوبت پوسته (%) Crust Moisture (%)	سفتی (N) Firmness (N)	قابلیت جویدن Chewiness	پیوستگی Cohesiveness	
روز صفر Zero day	98.63 <sup>a</sup>	43.11 <sup>a</sup>	16.15 <sup>a</sup>	3.22 <sup>a</sup>	206.06 <sup>c</sup>	0.63 <sup>a</sup>	59.89 <sup>a</sup>
روز دوم Second day	97.57 <sup>b</sup>	36.62 <sup>b</sup>	21.46 <sup>b</sup>	7.76 <sup>b</sup>	397.13 <sup>b</sup>	0.57 <sup>b</sup>	56.73 <sup>ab</sup>
روز چهارم Fourth day	69.92 <sup>a</sup>	35.83 <sup>b</sup>	25.08 <sup>a</sup>	11.04 <sup>c</sup>	415.11 <sup>ab</sup>	0.51 <sup>c</sup>	49.32 <sup>c</sup>

حروف غیر یکسان نشان دهنده اختلاف آماری معنی دار در سطح  $p=0/05$  در هر ستون می‌باشد.

Different letters within each column indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).





### ۲.۲.۳. ارزیابی بافت

می‌افتد. برای ویژگی ارتجاعیت روند کاهش معنی‌داری در خلال انبارمانی مشاهده گردید که با نتایج حاصل از این مطالعات پیشین که افت ارتجاعیت را برای نان طی روزهای نگهداری گزارش نموده‌اند در یک راستا می‌باشد [۳۸، ۳۹].

هو و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که کاهش پایداری، وزن مولکولی و درجه پلیمریزاسیون مولکول‌های نشاسته، سبب افزایش زوال آن و نهایتاً کاهش ارتجاعیت و قابلیت جویدن نان تولیدی می‌گردد [۴۰]. در پژوهشی [۴۱] اثر گلوتن بر بیاتی نان را طی ۷ روز بر بافت، رتروگراسیون آمیلوپکتین، وضعیت آب و تحرک مولکولی H-1 مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این تحقیق مشخص گردید که افزایش گلوتن و مقدار آب بیشتر بر ارتجاعیت مغز نان مؤثر است، در نتیجه بافت نرم‌تری ایجاد می‌شود. در تحقیق دیگری [۴۲] اثر گلوکومانان<sup>۱</sup> بر بیاتی نان‌های سیوس‌دار بررسی شد. بر اساس نتایج مشخص گردید که گلوکومانان با جلوگیری از تبخیر گاز حین تبخیر و جذب آب، سبب ایجاد منافذ یکنواخت، بافت نرم و ارتجاعیت بیشتر، مقدار سفتی و بیاتی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، با بررسی گذشت زمان مشخص شد که میزان قابلیت جویدن در دوران نگهداری نیز دارای یک سیر صعودی معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

### ۳.۳. ارزیابی حسی

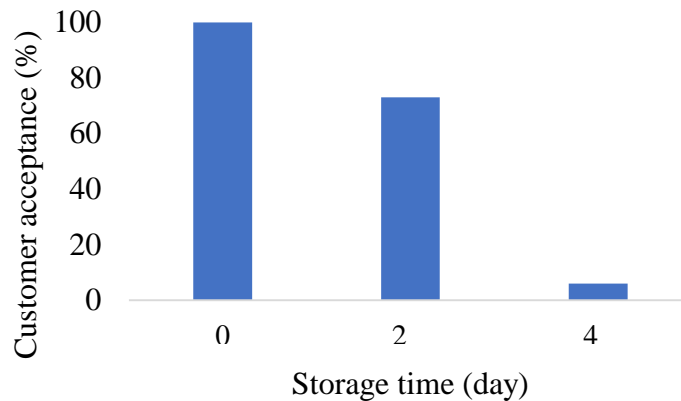
پدیده بیاتی، علاوه بر تغییر در بافت، توأم با افت عطر و طعم می‌باشد که سبب کاهش پذیرش مصرف‌کننده می‌شوند. افت ویژگی‌های حسی با کاهش آلدئیدها و افزایش کتون‌ها همراه است [۴۳]. در این پژوهش برای ارزیابی اثر مدت زمان نگهداری بر گرایش مصرف‌کننده به مصرف فرآورده موردنظر از درصد پذیرش استفاده شد. درصد پذیرش مصرف‌کننده در برابر مدت زمان نگهداری در شکل (۳)، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نمایش

طی نگهداری و با بیات شدن نان، سفتی بافت نان افزایش و ارتجاعیت آن کاهش می‌یابد [۲۲]. از این رو همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج (جدول ۱) نشان داد که مدت زمان نگهداری سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در پارامترهای سفتی و ارتجاعیت گردید. به طوری که سفتی و ارتجاعیت بافت نمونه‌ها طی مدت زمان نگهداری، به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی داشتند. سفت شدن بافت فرایندی پیچیده است که می‌توان آن را مربوط به مهاجرت آب از بخش درونی به پوسته [۳۲]، و همچنین انتقال آب بین ترکیبات آب‌دوست آرد (گلوتن و نشاسته)، رتروگراسیون نشاسته و برهم‌کنش‌های بین نشاسته و گلوتن دانست. در این میان، رتروگراسیون نشاسته اغلب مهم‌ترین فاکتور مؤثر در سفتی بافت نان در نظر گرفته می‌شود [۳۳]. بعلاوه افزایش سفتی نان عمدتاً به محتوای گلوتهین در پروتئین گندم بستگی دارد که به محتوای پیوندهای دی‌سولفیدی بین و درون‌مولکولی در گلوتهین مربوط می‌شود [۳۴]. سانتوس و همکاران (۲۰۲۱) وجود فیبر بالا در نان عاری از گلوتن را از عوامل احتمالی بیشتر بودن ارتجاعیت و پیوستگی نسبت به نمونه شاهد در خلال انبارمانی دانسته‌اند [۳۵]. پیوستگی، توصیف مقاومت درونی ساختار نان است که مقدار آن در روزهای نگهداری با گذشت زمان به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). این روند می‌تواند به دلیل تراکم برخی از قسمت‌های داخلی نان باشد که در اثر پدیده بیاتی اتفاق می‌افتد [۳۶]. ارتجاعیت، یکی از خصوصیات مهم بافتی است که می‌توان آن را نیز به‌وسیله مصرف‌کننده ارزیابی نمود. بدین‌صورت که این پارامتر را می‌توان با فشار دادن آرام قطعه‌ای از ماده غذایی با دست و یا به‌وسیله دهان و بررسی نحوه بازگشت آن به موقعیت اولیه مورد بررسی قرار داد [۳۷]. این ویژگی حاصل برهم‌کنش بین نشاسته ژلاتینه شده و گلوتن در خمیر می‌باشد که افزایش الاستیسیته خمیر و ایجاد ساختار اسفنج مانند در نان را پس از حرارت دادن به دنبال دارد. در نتیجه افزایش الاستیسیته، افزایش فنریت اتفاق

1. Glucomannan

شاخصی برای بیاتی است، می‌باشد. این یافته‌ها با نتایج مانانو و همکاران (۲۰۲۱) و اریکسون و همکاران (۲۰۱۴) که گزارش کردند افزایش سفتی و کاهش ارتجاعیت سبب کاهش پذیرش نمونه‌ها می‌شود همخوانی دارد [۴۴، ۴۵].

داده شده است با افزایش مدت زمان نگهداری، درصد پذیرش نمونه‌ها کاهش یافته است. درصد پذیرش، در روز صفر نگهداری برابر ۱۰۰، روز دوم نگهداری برابر ۷۳ و روز چهارم نگهداری برابر ۶ درصد بود. این افزایش در عدم پذیرش مصرف‌کننده ناشی از افت محسوس در ویژگی‌های حسی که

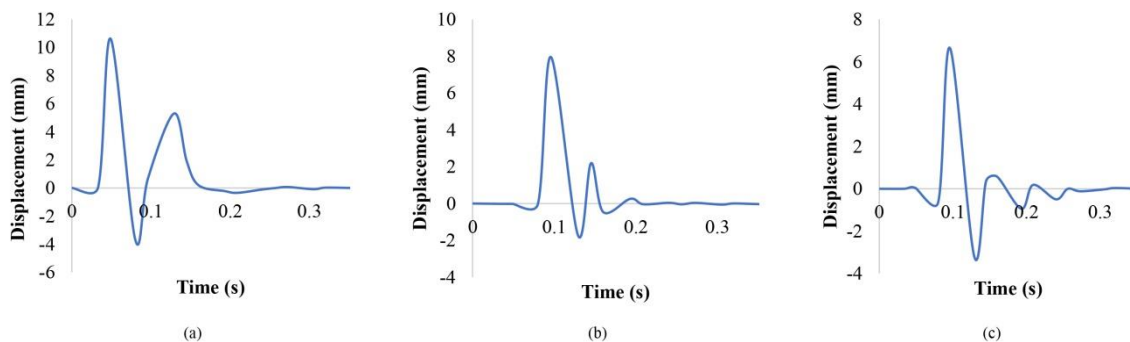


شکل (۳) پذیرش نان‌های باگت از جانب مصرف‌کننده در روزهای انبارمانی مختلف.  
**Fig 3.** Customer acceptance of the baguette bread at different storage day.

مسئله را می‌توان به کاهش ضریب میرایی (از ویژگی‌های ارتعاشی) و افزایش سفتی و کاهش ارتجاعیت (از ویژگی‌های بافتی) در نمونه‌ها نسبت داد. کاهش ضریب میرایی نشان از کاهش انرژی تلف شده در نمونه‌ها است که نمایانگر سفت-شدگی یا کاهش ارتجاعیت آنها می‌باشد. این مشاهدات با نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز بافت نان (جدول ۱) مطابقت دارد.

### ۴.۳. ویژگی‌های ارتعاشی

شکل (۴) پاسخ ارتعاشی یک نمونه نان باگت در خلال انبارمانی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است نان در روز اول بعد از تحریک، جابه‌جایی بزرگی از خود نشان می‌دهد و با گذشت زمان این بزرگی کاهش یافته در حالی که میزان نوسانات در اثر تحریک افزایش می‌یابد. این



شکل (۴) پاسخ تحریک نان باگت در روز ۰ (a)، ۲ (b) و ۴ (c) انبارمانی.  
**Fig 4.** Impulse response of the baguette bread on storage day: a) 0, b) 2 and c) 4.

از اعمال نیرو افزایش یافت که این مسئله در تعداد عبورهای نمودار ارتعاشی از نقطه صفر کاملاً مشهود است. از طرفی می‌توان این مشاهده را به افزایش مدول الاستیک که سبب کاهش توانایی نمونه‌ها در استهلاک انرژی و همچنین سبب کاهش میزان جابه‌جایی در آنها می‌گردد، نسبت داد [۴۷]. در پژوهشی مارینوپولو و همکاران (۲۰۱۹)، گزارش کردند که با افزایش انبارمانی میزان مدول الاستیک در نمونه‌های نان ورقه‌ای افزایش معنی‌داری دارد [۴۸]. بعلاوه در مطالعه‌ای دیگر که بیاتی نان را با روش صوتی-ارتعاشی ارزیابی نمودند مشخص گردید که میزان ضریب میرایی با افزایش زمان انبارمانی کاهش چشمگیری داشته است [۴۹]؛ یافته‌های پژوهش‌های فوق‌الذکر مؤید نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. از طرف دیگر میزان بیشینه جابه‌جایی نیز به دلیل افزایش سفتی در نمونه‌ها روند کاهشی معنی‌داری داشت به شکلی که بیشترین مقدار آن در روز صفرم و کمترین مقدار آن در روز چهارم انبارمانی به دست آمد. این مسئله با افزایش در سفتی و کاهش ارتجاعیت نمونه‌ها طی مدت انبارمانی (جدول ۱) قابل توجیه می‌باشد. انرژی، میانگین، آنتروپی و انحراف معیار نیز روند کاهشی معنی‌داری داشتند به‌گونه‌ای که بیشتر مقدار این ویژگی‌ها در روز صفرم انبارمانی رؤیت شد که اختلاف معنی‌داری با دیگر روزها در سطح احتمال ۵٪ مشاهده گردید. در پژوهشی جنتی و همکاران (۲۰۲۲)، گزارش نمودند که آنتروپی در نمونه‌های دارای بافت نرم‌تر، دارای مقادیر بالاتری نسبت به نمونه‌های دارای بافت سفت و متراکم می‌باشد [۲۷]. این نتیجه با یافته‌های پژوهش حاضر (یعنی روند کاهشی معنی‌دار برای آنتروپی طی انبارمانی نمونه‌های نان) مطابقت دارد.

نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز آماری پارامترهای ارتعاشی در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، مدت زمان نگهداری سبب تغییرات معنی‌داری در پارامترهای ارتعاشی نان شده است. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است فرکانس طبیعی یک روند افزایشی-کاهشی داشت، به‌طوری‌که در روزهای صفر و دوم انبارمانی یک روند افزایشی ( $p > 0.05$ ) اما در روز چهارم یک کاهش معنی‌دار مشاهده گردید ( $p < 0.05$ ). روند افزایشی فرکانس طبیعی تا روز دوم نگهداری را می‌توان به افزایش اولیه رطوبت سطحی نسبت داد؛ البته با توجه به اینکه این افزایش در مقایسه با روز صفر انبارمانی تفاوت معنی‌داری نداشته است قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. اما با گذر زمان مقدار فرکانس طبیعی مجدد کاهش می‌یابد. در تحقیقی لاندال و تری (۲۰۲۰)، با استفاده از لیزر ویبرومتری داپلر<sup>۱</sup> (LDV) میزان سفتی میوه آووکادو را بررسی نمودند. آنها اطلاعات مربوط به تغییر شکل نیرو و سیگنال‌های زمان ارتعاش را با استفاده از دو نوع میوه آووکادو که در دمای  $12^{\circ}\text{C}$  و  $18^{\circ}\text{C}$  رسیده بودند را در طول انبارمانی ثبت کردند. مطالعه آنها نشان داد که LDV یک روش غیرمخرب است و فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده توسط LDV، در مقابل کاهش سفتی و سایر تغییرات فیزیویژیکی، در طول رسیدن میوه آووکادو، ۲ تا ۴ برابر کاهش داشته است که با کاهش سفتی مطابقت داشت [۴۶]. بعلاوه ضریب میرایی نیز روندی کاهشی داشت که این مسئله حاکی از کاهش میزان ارتجاعیت و خاصیت ویسکوالاستیک در نمونه‌ها می‌باشد. کاهش ضریب میرایی سبب کاهش توانایی نمونه‌های نان در جذب میزان نیروی اعمالی است، لذا با افزایش زمان انبارمانی میزان نوسانات بعد

جدول (۲) تأثیر مدت زمان نگهداری بر پارامترهای ارتعاشی نان.

Table 2. The effect of storage time on the vibrational parameters of bread

ویژگی‌های ارتعاشی Vibrational Characteristics								
فرکانس طبیعی (Hz) Natural Frequency (Hz)	میانگین (mm/mv) Average (mm/mv)	اوج (mm/mv) Peak (mm/mv)	انحراف معیار (mm/mv) Standard Deviation (mm/mv)	نسبت میرایی Damping ratio	انترپی Entropy	انرژی Energy	عبور از صفر Zero- crossing	زمان (روز) Time (day)
196.08 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>	9.61 <sup>a</sup>	2.94 <sup>a</sup>	0.52 <sup>a</sup>	790.59 <sup>a</sup>	22.00 <sup>a</sup>	6.12 <sup>a</sup>	روز صفر Zero day
211.44 <sup>a</sup>	0.45 <sup>b</sup>	6.95 <sup>b</sup>	1.99 <sup>b</sup>	0.31 <sup>b</sup>	453.19 <sup>b</sup>	18.53 <sup>b</sup>	10.60 <sup>b</sup>	روز دوم Second day
178.76 <sup>b</sup>	0.13 <sup>c</sup>	5.65 <sup>b</sup>	1.82 <sup>c</sup>	0.25 <sup>b</sup>	365.29 <sup>c</sup>	17.52 <sup>b</sup>	12.40 <sup>b</sup>	روز چهارم Fourth day

حروف غیر یکسان نشان دهنده اختلاف آماری معنی دار در سطح  $p=0.05$  در هر ستون می‌باشد.

Different letters within each column indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

### ۵.۳. آنالیز همبستگی

شده است. ضرایب منفی معرف رابطه معکوس، ضریب مثبت

معرف رابطه مستقیم و ضریب حوالی صفر نمایانگر عدم  
وجود رابطه خطی بین متغیرها است.

مقادیر ضرایب همبستگی میان پارامترهای ارتعاشی  
به‌دست‌آمده با روش ارائه‌شده و پارامترهای بافتی  
به‌دست‌آمده از دستگاه بافت‌سنج در جدول (۳)، نشان داده

جدول (۳) ضرایب همبستگی بین پارامترهای ارتعاشی و متغیرهای بافتی.

Fig 3. Correlation coefficients between the vibrational parameters and texture feature

ویژگی‌های ارتعاشی Vibrational Characteristics								
فرکانس طبیعی (Hz) Natural Frequency (Hz)	میانگین (mm/mv) Average (mm/mv)	اوج (mm/mv) Peak (mm/mv)	انحراف معیار (mm/mv) Standard Deviation (mm/mv)	نسبت میرایی Damping ratio	انترپی Entropy	انرژی Energy	عبور از صفر Zero- crossing	ویژگی‌های بافتی Texture parameter
-0.08	-0.28	-0.62*	-0.91**	-0.87**	-0.93**	-0.71*	0.98**	سفتی Firmness
-0.12	-0.23	-0.51	-0.89**	-0.80**	-0.88**	-0.80**	0.87**	قابلیت جویدن Chewiness
0.18	0.20	0.30	0.87**	0.87**	0.86**	0.56*	-0.88**	پیوستگی Cohesiveness
0.07	0.32	0.48	0.90**	0.88**	0.89**	0.70*	-0.89**	ارتجاعیت Springiness

\* و \*\* به ترتیب همبستگی در سطح  $0.05$  و  $0.001$  معنی‌دار می‌باشد.

\* and \*\* represent significant correlations at the level of 0.05 and 0.001, respectively.

(دمای اتاق) و  $18^{\circ}\text{C}$  - (دمای انجماد)، ۹۶ ساعت بعد از پخت نان و در دو ناحیه  $1150-3000$  و  $3600-3000$  آزمایش شدند، که همبستگی بالایی ( $r = -0.97$ ) بین نیروی فشاری و طول موج ۹۶۰ در دمای اتاق گزارش شده است. به علاوه آنها گزارش کردند که میان منحنی جذب نمونه‌ها در خلال انبارمانی همپوشانی وجود داشت. در مطالعه‌ای دیگر روساینک و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند که میان پاسخ آرایه‌های حسگر بینی الکترونیک و نیروی نفوذ در نان ارتباط معکوسی وجود دارد به طوری که با گذشت یک روز از انبارمانی، میزان خروجی سامانه طراحی شده ۵ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد [۱۵]. در مطالعه‌ای دیگر [۱۹]، پاسخ صوتی-مکانیکی ویفر به‌منظور ارزیابی تردی آن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش آن‌ها مشخص گردید که تردی با بیشینه پاسخ صوت، آنتروپی و میانگین فشار صدا همبستگی دارد.

براساس نظر نعمتی‌نیا و آبدانان مهدی‌زاده (۲۰۱۸)، ضرایب همبستگی بین  $1-0.8$  نشان از ارتباط بسیار قوی خطی با متغیر وابسته دارند [۵۲]. لذا به‌منظور آموزش و آزمون رگرسیون ماشین بردار پشتیبان از ویژگی‌های با ضریب همبستگی بالاتر  $0.8$  (یعنی تعداد عبود از صفر، آنتروپی، ضریب میرایی و انحراف معیار) استفاده گردید. جدول (۴) نتایج آموزش و آزمون رگرسیون ماشین بردار پشتیبان با این ویژگی‌ها را نمایش می‌دهد.

مطابق جدول (۴) رگرسیون بردار پشتیبان با کرنل خطی نسبت به دو کرنل دیگر سفتی و ارتجاعیت را با خطای کمتری پیش‌بینی می‌نماید. این در حالی که کرنل درجه دو ویژگی پیوستگی را با خطای کمتر ( $\text{RMSE} = 0.13$ ) و ضریب همبستگی بالاتر ( $R^2 = 0.89$ ) نسبت به دو کرنل دیگر پیش‌بینی نمود. در حالت کلی با توجه به خطای سه کرنل و همچنین ضریب همبستگی به‌دست‌آمده کرنل خطی در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی عملکرد بهتری نسب به دو کرنل دیگر داشت. در پژوهشی آرگری و همکاران (۲۰۱۳)، از سه کرنل خطی، چندجمله‌ای و RBF به‌منظور پیش‌بینی

همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است، نتایج حاصل از آنالیز همبستگی نشان داد که آنتروپی در مقایسه با سایر پارامترهای ارتعاشی، رابطه خطی قوی‌تری با سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت داشت. بعلاوه همبستگی بسیار قوی معنی‌داری میان آنتروپی، انحراف معیار و ضریب میرایی در سطح احتمال ۱٪ با ویژگی‌های بافتی نان به دست آمد. ضریب همبستگی میان پارامتر ضریب میرایی و سفتی و قابلیت جویدن معنی‌دار و منفی مشاهده گردید ( $p < 0.01$ ). دلیل منفی بودن ارتباط این پارامتر با سفتی و قابلیت جویدن روند کاهشی این پارامتر ارتعاشی و روند افزایشی سفتی و قابلیت جویدن طی مدت زمان نگهداری است. این مسئله برای ارتجاعیت و پیوستگی برعکس سفتی و قابلیت جویدن است؛ زیرا همان‌طور که پارامتر ارتعاشی ضریب میرایی طی مدت زمان نگهداری روند کاهشی دارند، ارتجاعیت و پیوستگی نیز دارای روند کاهشی می‌باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های بالوین و همکاران (۲۰۰۵)، که گزارش نمودند میان ویژگی‌های سفتی و پیوستگی اندازه-گیری شده از آزمون بافت با پارامترهای دینامیکی ویسکوالاستیک نان (مدول اتلاف<sup>۱</sup> و مدول ذخیره‌سازی<sup>۲</sup>) ارتباط منفی وجود دارد در یک راستا می‌باشد [۵۰]. کویی و همکاران (۲۰۱۴)، ارتباط بین پارامترهای ارتعاشی و سفتی هندوانه را مورد بررسی قرار دادند [۵۱]. نتایج این تحقیق، یک رابطه خطی ( $r = 0.410$  و با  $p < 0.01$ ) بین سفتی و پارامتر ارتعاشی حاصل از ارتعاش سنج داپلر نشان داد. اما میان فرکانس طبیعی و میانگین با سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت همبستگی بسیار ضعیفی مشاهده گردید. المحاسنه و همکاران (۲۰۱۸)، از طیف‌سنجی MR-FTIR<sup>۳</sup> برای بررسی بافت نان و تأثیر زمان و دمای نگهداری بر بیاتانی آن استفاده کردند [۳۰]. در این مطالعه زمان گسیختگی، نیروهای فشاری و کششی در دو دمای  $23^{\circ}\text{C}$

1. Loss modulus
2. Storage modulus
3. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

فساد گوشت استفاده نمودند [۵۳]. بر اساس نتایج گزارش شده کرنل خطی نسب به دو کرنل دیگر عملکرد بهتری در تشخیص فساد گوشت داشت. در پژوهشی دیگر [۵۴]، از کرنل‌های مختلف به منظور پیش‌بینی رطوبت

بادام‌زمینی حین خشک شدن استفاده شد. بر اساس نتایج کرنل خطی با خطای (RMSE= ۴/۲۲) نسبت به کرنل RBF با خطای (RMSE= ۴/۳۸) عملکرد بهتری داشت.

جدول (۴): ارزیابی پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی SVR آموزش دیده با کرنل‌های مختلف.

Table 4. Prediction evaluation of textural characteristics of SVR trained with different kernels

		ویژگی‌های بافتی Textural Characteristics							
		سفتی Firmness		قابلیت جویدن Chewiness		پیوستگی Cohesiveness		ارتجاعیت Springiness	
نوع کرنل Kernel Type	معیارهای ارزیابی Evaluation Characteristics	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test
خطی Linear	R <sup>2</sup>	0.97	0.93	0.82	0.82	0.89	0.88	0.94	0.94
	RMSE	0.91	1.34	10.58	11.02	0.11	0.15	2.16	2.94
درجه دو Quadratic	R <sup>2</sup>	0.92	0.89	0.82	0.82	0.90	0.89	0.91	0.90
	RMSE	1.48	1.94	9.43	9.61	0.09	0.13	4.81	6.02
پایه شعاعی RBF	R <sup>2</sup>	0.90	0.91	0.82	0.82	0.86	0.88	0.89	0.85
	RMSE	1.55	1.50	12.15	12.59	0.19	0.14	6.58	7.65

زوال و پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان باگت را داراست.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای ارتعاشی نان طی نگهداری توسط یک حسگر داپلر به صورت غیر مخرب به دست آمد. ۹ ویژگی ارتعاشی (فرکانس طبیعی، نسب میرایی، تعداد عبور از نقطه صفر، میانگین و انحراف معیار، اوج و انرژی شدت ارتعاش، فرکانس طبیعی و آنتروپی) با استفاده از این روش محاسبه گردید. همچنین متغیرهای بافتی (سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت) حاصل از بافت درونی نان توسط دستگاه بافت سنج محاسبه شد. نتایج، نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار مدت زمان نگهداری بر ویژگی‌های ارتعاشی بود. همچنین آنالیز همبستگی نشان داد ویژگی‌های ارتعاشی همبستگی بالایی با متغیرهای بافتی دارند. از میان

در پژوهشی بافت نان حاصل از ۱۰ رقم گندم بهاره لهستانی با مدل رگرسیون چندگانه پیش‌بینی گردید. بهترین نتیجه حاصل برای مدل توسعه یافته میزان سفتی و چسبندگی برای نان را به ترتیب  $R^2=0/801$  و  $R^2=0/827$  پیش‌بینی می‌نمود [۵۵]. در مطالعه‌ای دیگر حاتمیان و همکاران (۲۰۲۰)، از ترکیب پاسخ صوتی و شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی سفتی، قابلیت جویدن و چسبندگی پرداختند [۵۶]. بر اساس نتایج شبکه عصبی آموزش دیده با ویژگی‌های بیشترین مقدار صدا، واریانس، انحراف معیار، میانگین جذر قدر مطلق سیگنال، انرژی، آنتروپی و فرکانس طبیعی، سفتی، قابلیت جویدن و چسبندگی را به ترتیب با  $R^2=0/97$ ،  $R^2=0/95$  و  $R^2=0/93$  پیش‌بینی می‌نمود. با توجه به پژوهش‌های ذکر شده سامانه طراحی شده در این پژوهش با دقت ارائه شده در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی توانایی بالایی در تشخیص

به خطای به‌دست‌آمده کرنل خطی در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت به ترتیب با خطای ۱/۳۴، ۱۱/۰۲، ۰/۱۵ و ۲/۹۴ عملکرد بهتری نسب به دو کرنل دیگر داشت.

### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌نمایند.

پارامترهای ارتعاشی، تعداد عبور از صفر و آنتروپی قوی‌ترین همبستگی را با سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت داشت. به طوری که ضریب همبستگی تعداد عبور از صفر و سفتی ۰/۹۸ با  $p < ۰/۰۰۱$  و ضریب همبستگی آنتروپی و ارتجاعیت ۰/۸۹- با  $p < ۰/۰۰۱$  بود. بنابراین مطالعه حاضر پیشنهاد می‌کند، دستگاه شتاب سنج طراحی شده، می‌تواند برای ارزیابی غیر مخرب و سریع بیاتی نان، کاملاً مفید واقع شود. نهایتاً با ویژگی‌ها به‌دست‌آمده به کمک رگرسیون ماشین بردار پشتیبان با ۳ کرنل خطی، درجه دو و کرنل تابع پایه شعاعی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان (سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت) توسعه یافت. با توجه

### منابع

- [1] Abdanan Mehdizadeh, S. (2022). Machine vision based intelligent oven for baking inspection of Cupcake: Design and implementation. *J. Mechatronics.*, 82(2), 102746.
- [2] Liu, D., Zeng, X.A. & Sun, D.W. (2015). Recent development and application of hyperspectral imaging for quality evaluation of agricultural products: A review. *Crit Rev Food Sci Nut.*, 55(12), 1744-1757.
- [3] Alander, J., Bochko, V., Martinkauppi, B., Saranwong, S. & Mantere, T. (2013). A Review of Optical Nondestructive Visual and Near-Infrared Methods for Food Quality and Safety. *International J. Spectroscopy.*, 2013(3), 341402.
- [4] Qamruzzaman, M., Ahmed, F. & Mondal, Md. (2022). An overview on starch-based sustainable hydrogels: Potential application and aspects. *J. Polymers & Environment*, 29(6), 1-32.
- [5] Bosmans, G. M., Lagrain, B., Ooms, N., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2013). Biopolymer interactions, water dynamics, and bread crumb firming. *J. Agric. Food Chem.*, 61(19), 4646-4654.
- [6] Ribotta, P.D. & Le-Bail, A. (2007). Thermophysical assessment of Bread during staling. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie.*, 40(5), 879-884.
- [7] Curti, E., Carini, E., Tribuzio, G. & Vittadini, E. (2014). Bread staling: effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility. *LWT-Food Sci. Technol.*, 59(1), 418-425.
- [8] Liu, Z. & Scanlon. (2003). Predicting Mechanical Properties of Bread Crumb. *J. Food and Bioproducts Processing.*, 81(3), 224-238.
- [9] Tournier, C., Grass, M., Zope, D., Salles, C. & Bertrand, D. (2012). Characterization of bread breakdown during mastication by image texture analysis. *J. Food Eng.*, 113(4), 615-622.
- [10] AACC (American Association of Cereal Chemists). 1995. Method 74-09. Bread Firmness by Universal Testing Machine. Approved Methods (Vol. II). MNUSA: St Paul.
- [11] Le-Bail, A., Boumali, K., Jury, V., Ben-Aissa, M.F. & Zuniga, R. (2009). Impact of the kinetic of baking on staling rate and on the mechanical properties of crumb and degassed crumb. *J. cereal science.*, 50(2), 235-240.
- [12] Nouri, M., Nasehi, B., Goudarzi, M. & Abdanan Mehdizadeh., S. (2018). Non-destructive Evaluation of bread Staling Using Gray Level Co-occurrence Matrices. *Food Analytical Meth.*, 11(2).
- [13] Leiva-Valenzuela, G., Quilaqueo, M., Mariotti-Celis, M.S., Letelier, K., Estay, D. & Pedreschi, F. (2019). Predicting furan content in a fried dough system using image analysis. *J. Food Chem.*, 298(2), 125096.
- [14] Polak, A., Coutts, F.K., Murray, P. & Marshal, S. (2019). Use of hyperspectral imaging for cake moisture and hardness prediction. *Image Processing, IET.*, 13(7), 1142-1160.
- [15] Rusinek, R., Gancaraz, M. & Agieszka, N. (2020). Application of an electronic with novel

- method for generation of smellprints for testing the suitability for consumption of wheat bread during 4-day storage. *J. Food Sci. Technol.*, 117, 108665.
- [16] Xie, F., Dowell, F. & Sun, X. (2003). Comparison of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy and Texture Analyzer for Measuring Wheat Bread Changes in Storage. *J. Cereal Chem.*, 80(1), 25-29.
- [17] Chen, J., Karlsson, C., & Povey, M. (2005). Acoustic envelope detector for crispness assessment of biscuits. *J. Texture Studies.*, 36(2), 139-156.
- [18] Jakubczyk, E., Gondek, E. & Tryzno, E. (2017). Application of novel acoustic measurement techniques for texture analysis of co-extruded snacks. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technol.*, 75(4), 582-589.
- [19] Carsanba, E., Duerrschmid, K., & Schleining, G. (2018). Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products. *J. Food Eng.*, 229, 93-101.
- [20] Taniwaki, M., Sakurai, N. & Takahashi, M. (2009). Determination of optimum ripeness for edibility of postharvest melons using nondestructive vibration. *Food Research Internationnal.*, 42(1), 137-141.
- [21] Teraski, Sh., Sakurai, N., Zebrowski, J., Murayama, H., Yamamoto, R. & Nevins, D. (2006). Laser Doppler vibrometer analysis of changes in elastic properties of ripening 'La France' pears after postharvest storage. *Postharvest Biol. Technol.*, 42(2), 198-207.
- [22] Purhagen, J., Sjoo, M. & Eliasson, A. (2011). Starch affecting anti-staling agents and their function in freestanding and pan-baked bread. *Food Hydrocolloids.*, 25(7), 1656-1666.
- [23] AACC (American Association of Cereal Chemists). 2000. Method 44-19, Moisture, Approved Methods. MN, USA: St Paul.
- [24] Curti, E., Carini, E., Tribuzio, G. & Vittadini, E. (2014). Bread staling: Effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility. *LWT-Food Sci. Technol.*, 59(1): 418-425.
- [25] Guine, R.P.F. (2020). Evaluation of texture of cheese by-products incorporated bread. *Braz. J. Food Technol.*, 23(Pt1), e2019319.
- [26] Baixauli, R., Salvador, A., & Fiszman, S. (2008). Textural and colour changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch. *European Food Research Technol.*, 226(3), 523-530.
- [27] Janati, S., Abdanan Mehdizadeh, S. & Heydari, M. (2022). Designing, Manufacturing, and evaluating the diagnostic system of carob moth in pomegranate fruit using digital signal processing. *J. Computer and Electronics Agric.*, 192, 106564.
- [28] Amraei, S., Abdanan Mehdizadeh, S. & Sallary, S. (2017). Application of computer vision and support vector regression for weight prediction of live broiler chicken. *Engineering in agriculture, environment & food.*, 10(4), 266-271.
- [29] Dai, Y., Wang, H., Wang, J., Wang, X., Wang, Zh. & Ge, X. (2022). Prediction of water quality based on SVR by fluorescence Excitation-Emission matrix and UV-Vis absorption. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy.*, 273(15), 121059.
- [30] Al-Mahasneh, M., Aljarrah, M., Rababah, T. & Aludatt, M. (2018). Using MR-STIR and Texture Profile to Track the Effect of Storage Time and Temperature on Pita Bread Staling. *Journal of Food uality.*, 2018(1), 1-9.
- [31] Izadi Najafabadi, L., Le-Bail, A., Hamdami, N., Monteau, J., & Keramat, J. (2014). Impact of baking conditions and storage temperature on staling of fully and part-baked Sangak bread. *Journal of Cereal Science.*, 60(1), 151-156.
- [32] Curti, E., Bubici, S., Carini, E., Baroni, S., & Vittadini, E. (2011). Water molecular dynamics during bread staling by nuclear magnetic resonance. *LWT-Food Sci. Technol.*, 44(4), 854-85.
- [33] Ndlala, F. N., Onipe, O. O., Mokhele, T. M., Anyasi, T. A. & Jideani, A. L. (2019). Effect of wheat bran incorporation on the physical and sensory properties of a South African cereal fried dough. *Food.*, 8(11), 559.
- [34] Luo, D., Wu, R., Zhang, J., Zhang, K., Xu, B., Li, P., Yuan, Y. & Li, X. (2018). Effects of ultrasound assisted dough fermentation on the quality of steamed bread. *J. of Cereal Sci.*, 83, 147-152.
- [35] Santos, F. G. & Capriles, V. D. (2021). Relationship between dough thermomechanical parameters and physical and sensory properties gluten-free bread texture during storage. *LWT*, 139, 110577.
- [36] Cai, L., Choi, I., Lee, Ch., Park, K. & Baik, B. (2014). Bran Characteristics and Bread-baking quality of whole grain wheat flour. *J. Cereal Chem.*, 91(4), 398-405.
- [37] Gomez, M., Ronda, F., Caballero, P.A., Blanco, C. A. & Rosell, C. M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf life of





- yellow layer cakes. *J. Food Hydrocolloids.*, 21(2), 167-173.
- [38] Ziobro, R., Korus, J., Juszczak, L. & Witczak, T. (2013). Influence of inulin on physical characteristics and staling rate of gluten-free bread. *J. Food Eng.*, 116(1), 21-27.
- [39] Martinez, M. M., Diaz, A. & Gomez, M. (2014). Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making. *J. Food Eng.*, 142, 49-56.
- [40] Hu, A., Li, L., Zeng, J., Lu, J., Meng, X., Liu, Y. & Rizwan Ur, R. (2014). Different frequency ultrasonic effects on properties and structure of corn starch. *J. Sci. Food Agric.* 94(14), 2929-2934.
- [41] Curti, E., Carini, E., Tribuzio, G. & Vittadini, E. (2014). Bread staling: Effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility. *LWT-Food Sci. Technol.*, 59(1): 418-425.
- [42] Kumala, T., Sutrisno, A. & Yuniarta, Y. (2020). Glucmannan as an anti-staling agent to improve the texture value whole wheat bread. *IOP Conf. Series: Earth & Environmental Science*, 475(1): 012030.
- [43] Alpers, Th., Kerpes, R., Frioli, M., Nobis, A., Hoi, K., Bach, A., Jekle, M. & Becker, Th. (2021). Impact of storing Condition on staling and microbial spoiling behavior of Bread and their contribution to prevent food waste. *J. Foods.*, 10(1), 76.
- [44] Manano, J., Ogwok, P., Byarugaba-Baziraka, G. W. & Mugampoza, E. (2021). Rheological, baking and sensory characteristics of Bread from Wheat-Cassava composite dough. *J. Food Res.*, 10(5), 1-18.
- [45] Eriksson, E., Koch, K., Tortoe, Ch., Akonor, P. T. & Oduro-Yeboah, C. (2014). Evaluation of the physical and sensory characteristics of Bread produced from three varieties of cassava and wheat composite flours. *J. Food publ.*, 4(5), 214-222.
- [46] Landahl, S. & Terry, L. A. (2020). Non-destructive discrimination of avocado fruit ripeness using laser Doppler vibrometry. *J. of Biosystems Eng.*, 194(5), 251-260.
- [47] Zhang, Sh., Wang, W., Wang, Y., Fu, H. & Yang, Zh. (2021). Improved prediction of litchi impact characteristics with an energy dissipation model. *J. Postharvest Biol. Technol.*, 176(2), 111508.
- [48] Marinopoulou, A. Petridis, D. & Raphaelides, S.N. (2019). Assessment of texture changes in sliced pan bread on aging using sensory and instrumental method. *J. Food Processing and Preservation.*, 43(2), e13982.
- [49] Lapcik, L., Vasina, M., Lapcikiova, B. & Valenta, T. (2016). Study of bread staling by means of vibro-acoustic, tensile and thermal analysis techniques. *J. Food Eng.*, 178, 31-38.
- [50] Bollain, C., Angioloni, A. & Collar, C. (2005). Bread staling assessment of enzyme-supplemented pan breads by dynamic and static deformation measurements. *J. European Food Res. Technol.*, 220(1), 83-89.
- [51] Cui, D., Gao, Z., Zhang, W. & Ying, Y. (2015). The use of a laser Doppler vibrometer to assess watermelon firmness. *J. Computer & Electronics in Agri.* 112, 116-120.
- [52] Nematinia, E. & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018). Assessment of egg freshness by prediction Haugh unit and albumen pH using an artificial neural network. *J. Food Measurement & Characterization.*, 12(3), 1449-1459.
- [53] Argyri. A. A., Jarvis, R. M., Wedge, D. C., Xu, Y., Panagou, E., Goodacre, R. & Nychas, G. J. E. (2013). A comparison of Raman and FT-IR spectroscopy for the prediction of meat spoilage. *J. Food Control.*, 29(2), 461-470.
- [54] Qu, Ch., Wang, Z., Jin, X., Wang, X. & Wang, D. (2020). A moisture content prediction model for deep bed peanut drying using support vector regression. *J. Food Process Eng.*, 43(11), e13510.
- [55] Rozylo, R. & Laskowski, J. (2011). Predicting bread quality (bread loaf volume and crumb texture). *Polish J. Food & Nutrition Sci.*, 61(1), 61-67.
- [56] Hatamian, M., Noshad, M., Abdanan Mehdizadeh, S. & Barzegar, H. (2020). Intelligent Modeling of Bread texture Acoustic measurement method and artificial neural network (case study: Enriched bread with Chia). *J. Innovative Food Technol.*, 7(4), 517-534.