

*Research Article***Non-destructive Detection of Bread Staleness Using Hyperspectral Images****Saman Abdanan Mehdizadeh¹, Mohammad Noshad², Seyedeh Fatemeh Nouri³**

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. Associate professor, Department of food science and technology, Faculty of animal science and food technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
3. MSc, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

(Received 15 May 2023, Received in revised form 1 September 2023, Accepted 13 November 2023)

Introduction: Bread is a crucial source of sustenance, yet its texture is subject to rapid deterioration through a process commonly referred to as staling. The development of a non-destructive method for the expeditious evaluation of textural changes in bread during storage would facilitate research of the impact of various additives on bread's quality attributes and shelf life. Given that bread is among the most perishable of processed foods, devising techniques for the prompt detection of staling is of paramount importance. In recent years, hyperspectral imaging (HSI) systems have emerged as a highly precise and accurate non-destructive means of assessment and diagnosis within the agricultural and food industries. HSI cameras enable the scanning and observation of concurrent chemical mechanisms within bread's texture. HSI, also known as chemical or spectroscopic imaging, is an analytical technique that amalgamates chemical data derived from spectroscopy with spatial information pertaining to the surface under examination. As such, a sample's hyperspectral image contains an abundance of spatial and spectral-chemical data that are typically highly intercorrelated. The objective of this study was to assess bread staling through the utilization of hyperspectral imaging.

Materials and methods: To produce baguette bread dough, wheat flour was combined with sugar (1%), salt (1%), yeast (1.5%), and improver (1.5%) by weight of flour, along with the requisite quantity of water. The dough was then baked at 250 °C for 15 minutes. This study aimed to investigate the staling process of baguette bread by examining changes in the physical and sensory characteristics, as well as hyperspectral images, of samples stored at room temperature up to six days. Sample weights were recorded on days zero, two, four and six to determine the moisture content of the crust and crumb. The texture profile analysis (TPA) test was employed to assess sample texture during storage, with firmness, chewiness, cohesiveness, and springiness characteristics being calculated. Hyperspectral images were captured using a linear system operating within the 400-950 nm wavelength range with a spectral resolution of 0.795 nm. Hyperspectral image preprocessing was then conducted to eliminate spatial and spectral noises. Following preprocessing, principal component regression (PCR), partial least squares regression (PLSR) a generalized regression neural network model were utilized to predict texture characteristics. All procedures were executed using MATLAB 2022b and SAS software.

Results and discussion: Analysis of bread texture revealed that, over the course of six days of storage, the mass and moisture of the crumb exhibited a significant decreasing trend at the 5% probability level. Conversely, a significant increase in crumb moisture and firmness was observed during storage ($p < 0.05$). Springiness also demonstrated a significant decreasing trend, in contrast to cohesiveness. To ascertain the number of principal components containing the majority of image information, a graph depicting the number of principal components relative to the percentage of variance in each component was plotted cumulatively. It was determined that, for both PCR and PLS methods, the percentage variance in three principal components

exceeded 96%. With increasing bread storage duration, the percentage of positive components for all three principal components increased. For PC1, PC2, and PC3 on first day, these characteristics were 57%, 41%, and 28%, respectively, while on the final day of storage they were 98%, 61%, and 57%, respectively. This indicated a significant increasing trend at the 5% probability level for all three principal components during storage. These findings are entirely consistent with texture profile analysis (TPA) measurements. To examine the distinct spectral regions resulting from these three components, a PCA loading diagram was plotted over six days of storage; According to the PCA loading plot, peaks were observed in the 750-800 and 850-900 ranges. These peaks are likely attributable to the presence of water (the third overtone of the O-H bond) and carbohydrates (the third overtone of the C-H bond), which exhibit high absorption at 958 nm and 935 nm, respectively. Furthermore, a peak is observed around 430 nm for fresh bread (days zero and two of storage). This suggests an accumulation of Maillard reaction products such as Schiff bases during bread storage. An inverse trend is evident around 585 nm; for fresh samples, the second principal component loading had its highest value (i.e., 0.058), while its lowest value (i.e., 0.04) was observed for stale bread. This peak is most likely related to changes in bread color and the impact of storage thereon. In addition to these cases, one peak at 860 nm and another at 920 nm are visible; the former peak may be associated with the second overtone of N-H bond stretching while the latter is related to the O-H bond. Ultimately, several distinct wavelengths within visible and near-infrared regions that contribute to spectral loading values during storage were identified. These wavelengths include 423 nm, 470 nm, and 618 nm within the visible region and 715 nm, 768 nm, 850 nm, 894 nm, and 927 nm within the near-infrared region. The peaks indicate stretching vibrations of O-H and C-H bonds that are related to quantities of intact starch or gelatinized amylopectin.

Conclusions: In this study, hyperspectral imaging was employed to capture data within the 400-950 nm wavelength range with a spectral resolution of 0.795 nm. This enabled an examination of the bread staling process and its impact on the behavior of the entire surface of the bread crumb. Following extraction of principal components, three modeling methods—PCR, PLSR, and GRNN—were utilized to predict texture characteristics over six days of storage. Results indicated that the GRNN method outperformed the other two methods in terms of R^2 values for springiness and firmness (0.94 and 0.96, respectively) and lowest root mean square error (RMSE) values for cohesiveness and firmness (0.11 and 0.32, respectively). These findings demonstrate the capacity of the generalized regression neural network model to accurately predict bread texture characteristics.

Key words: *Bread staling, Hyperspectral imaging, Non-destructive evaluation, Generalized regression neural network*

How to cite this article:

Abdanan Mehdizadeh, S., Noshad, M & Nouri, F., (2023). Non-destructive Detection of Bread Staleness Using Hyperspectral Images. *Innov. Food Technol.*, 10(4), 299-317. DOI: <http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2023.6279.2142>

مقاله پژوهشی

تشخیص غیرمخرب بیاتی نان با استفاده از تصاویر فراطیفی

سامان آبدانان مهدی‌زاده^{۱*}، محمد نوشاد^۲، سیده فاطمه نوری^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع

طبیعی خوزستان

۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

خوزستان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم

کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵)

چکیده

تصویربرداری فراطیفی، ترکیبی از فناوری تصویربرداری و طیف‌سنجی است که مقادیر زیادی از اطلاعات فضایی و طیفی را به‌طور همزمان ارائه می‌دهد، و امروزه به‌عنوان یک ابزار تشخیص غیرمخرب و سریع برای ارزیابی کیفیت و ایمنی مواد غذایی در حال گسترش است. در این پژوهش با استفاده از تصویربرداری فراطیفی، در محدوده طول موج ۴۰۰-۹۵۰ nm و با وضوح کیفی ۰/۷۹۵ nm، چگونگی فرایند بیات شدن نان و تاثیر آن بر رفتار نان بررسی شد. بعد از استخراج مولفه‌های اصلی، به منظور پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی از سه روش مدل‌سازی PCR، PLSR و GRNN طی شش روز نگهداری استفاده شد؛ نتایج نشان دادند روش GRNN نسبت به دو روش دیگر دارای بیشترین مقادیر ضریب تشخیص R^2 برای دو ویژگی، ارتجاعیت و سفتی به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۴ و همچنین کمترین مقدار خطا RMSE برای دو ویژگی، پیوستگی و سفتی به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۲ می‌باشد که نشان دهنده توانایی مدل شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان است.

واژه‌های کلیدی: بیاتی نان، تصویربرداری فراطیفی، ارزیابی غیرمخرب، شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته

۱. مقدمه

که در آن گلوتن فاز پیوسته و نشاسته ژلاتینه نشده و آمیلوز نشت کرده از آن، فاز ناپیوسته است [۷].

برای ارزیابی و تعیین میزان بیاتی نان روش‌های گوناگونی گزارش شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به تفرق با اشعه ایکس، گرماسنجی پویشی افتراقی (DSC) و همچنین آزمون‌های رئولوژیکی، شیمیایی، حسی و آنزیمی اشاره نمود [۸]. اغلب این روش‌ها زمان‌بر هستند و به‌تنهایی حالت بیاتی را منعکس نمی‌کنند. بعلاوه نان یکی از غذاهای فرآوری شده با کمترین زمان ماندگاری است [۹]؛ بنابراین ارائه روش‌هایی برای تشخیص سریع بیاتی امری مهم به‌شمار می‌رود. تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت نان و تشخیص بیاتی با استفاده از روش‌های نوین انجام شده است که از آن جمله می‌توان به طیف‌سنجی انعکاسی مادون قرمز نزدیک (NIRS^۴) [۱۰]، طیف‌سنجی MR-FTIR^۵ [۱۱] پردازش تصویر [۱۲]، بینی الکترونیکی [۱۳] و روش ارتعاش-سنجی [۱۴] اشاره نمود که بر روی بافت نان صورت گرفته و نتایج موفقی به همراه داشته است.

کنترل فرایند تولید فراورده‌های غذایی نیاز به نظارت برخط دارد. روش‌های تحلیلی سریع و دقیق برای اطمینان از کیفیت، ایمنی و اصالت فراورده امری ضروری است. روش‌های سنتی ارزیابی مواد غذایی شامل کروماتوگرافی مایع (HPLC)، طیف‌سنجی جرمی (MS) و بافت سنجی، زمان‌بر، پرهزینه و مخرب هستند. در این میان گزارش‌های مبنی بر عملکرد مناسب روش‌های مختلف طیف‌سنجی به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب تجزیه و تحلیل کیفیت چند مؤلفه مواد غذایی صورت گرفته است [۱۵]. با این حال ناتوانی طیف‌سنجی‌های در اخذ گرادیان‌های تشکیل‌دهنده داخلی در فراورده‌های غذایی ممکن است منجر به اختلاف بین ترکیب پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، شود. علاوه بر این ارزیابی‌های طیف‌سنجی با اندازه‌گیری‌های منبع نقطه‌ای کوچک دارای اطلاعات مکانی دقیقی (که برای بازرسی مواد غذایی مهم می‌باشند) نیستند [۱۶]. پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های رایانه‌ای منجر به توسعه سیستم‌های تصویربرداری شده

نان یکی از منابع غذایی اولیه انسان است که تنها با چهار ماده اصلی آرد، آب، مخمر و نمک طبق دستورالعمل‌های مختلفی تولید می‌شود. با وجود این سادگی ظاهری، هنگام مخلوط شدن و حین پختن، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای در ترکیب آن رخ می‌دهد [۱]. بلافاصله پس از پخت، بافت نان با مجموعه‌ای از اثرات که به‌طور معمول با عنوان بیاتی شناخته می‌شوند، دچار تنزل کیفیت می‌شود. پیامد اصلی بیات شدن آن است که نان خاصیت ارتجاعی خود را از دست داده و سفت می‌شود که این مسئله سبب افزایش ضایعات این مواد غذایی می‌گردد [۲]. با توجه به پیامدهای اقتصادی فرایند بیاتی نان، یافتن راهی غیرمخرب برای ارزیابی سریع تغییرات بافت نان طی مدت زمان نگهداری کمک شایانی به پژوهشگران برای بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر ویژگی‌های کیفی و ماندگاری نان می‌نماید.

فرمولاسیون نان حاوی ترکیبات مختلفی است که در طول فرایند تولید و در زمان زوال^۱ محصول تولیدشده، ممکن است دچار تغییراتی شوند. تغییرات فیزیکوشیمیایی طی نگهداری نان منجر به سفت شدن مغز^۲ نان، تغییر طعم و از بین رفتن پوسته ترد آن می‌شود که تمامی این تغییرات بیاتی را تشکیل می‌دهند؛ به‌طور کلی نان خصوصیات حسی خود را از دست داده و استقبالی برای مصرف آن نمی‌شود که در نتیجه این امر، مقدار دور ریز نان زیاد شده و ضرر اقتصادی به همراه خواهد داشت [۳]. بیاتی نان شامل تغییرات فیزیکوشیمیایی مختلفی است که عبارت است از افزایش سفتی مغز نان، تغییر و از دست دادن طعم، عطر و تردی نان و همچنین از دست دادن رطوبت و واگشتگی نشاسته^۳ که دو عامل اصلی در سفت شدن مغز نان می‌باشند [۴، ۵]. هنگام نگهداری نان، پوسته تمایل به جذب رطوبت از مغز نان را دارد که این امر سبب سریع‌تر شدن فرایند بیاتی با از دست دادن رطوبت از سطح نان می‌شود [۶]. نان را می‌توان یک سیستم کلئیدی در نظر گرفت

1. aging
2. crumb
3. starch retrogradation

4. Near-infrared Reflectance Spectroscopy
5. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

ماهی‌های تازه، سرد شده و منجمد-ذوب‌شده طبقه‌بندی بهتری را ارائه کرد. آنها HSI را به‌عنوان یک تکنیک دقیق، سریع و غیر مخرب برای شناسایی تازگی ماهی تأیید کردند. در تحقیقی سالم و همکاران (۲۰۲۰) [۳۴]، به‌منظور پیش-بینی فساد میکروبی و ماندگاری محصولات نانوائی از تصویربرداری فراطیفی استفاده نمودند. در این پژوهش توانایی تصویربرداری فراطیفی در تشخیص موقعیت مکانی فساد میکروبی (محدوده ۳۹۵ تا ۱۰۰۰ nm)، تقریباً ۲۴ ساعت قبل از ظاهر شدن آن بر روی نمونه‌ها با دقت ۹۸/۱۳ درصد گزارش شد. در پژوهشی دیگر، سریچن‌راتانا و همکاران (۲۰۲۱) [۳۵]، با استفاده از تصویربرداری فراطیفی مادون قرمز نزدیک (NIR-HSI) به ارزیابی و طبقه‌بندی کیک بر اساس فعالیت‌های میکروارگانیسمی پرداختند. تصاویر در ناحیه ۹۳۵ تا ۱۷۲۰ nm، قادر به پیش‌بینی زمان نگهداری و طبقه‌بندی کیک شدند و با استفاده از مدل رگرسیون PLS، ضریب همبستگی $R=0/838$ ، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی $RMSEP=1/242$ و دقت پیش‌بینی را ۹۱/۳٪ گزارش نمودند و به‌عنوان یک روش غیرمخرب برای پیش‌بینی و تشخیص عمر مفید نگهداری کیک‌ها و همچنین تفکیک کیک‌های منقضی از غیر منقضی معرفی شد. همچنین در تحقیق دیگری کیم و همکاران (۲۰۲۲) [۳۶] برای تشخیص کمی مواد افزودنی مضر غذایی در غذای پودری (شیر، ناشسته و پودر گندم)، از یک سیستم تصویربرداری فراطیفی مادون قرمز موج کوتاه^۳ (SWIR) که با مدل‌های تشخیص رگرسیون حداقل مربعات جزئی و تحلیل مدل‌های بهینه واریانس ادغام شده بود، استفاده نمودند. تصاویر به‌دست‌آمده را به‌عنوان تصاویر باینری تعریف نموده و ضرایب تعیین‌کننده بالایی ($\leq 0/89$) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی را گزارش نمودند؛ و نشان دادند که سیستم SWIR-HSI استفاده شده با مدل‌های بهینه‌شده پتانسیل بالایی برای تشخیص افزودنی‌های غذایی در مواد غذایی پودری را دارد.

دوربین تصویربرداری فراطیفی امکان پویا و مشاهده مکانیسم‌های شیمیایی مختلف را که به‌طور همزمان در بافت

است که توانایی تشخیص سریع و دقیق عیوب و شناسایی ویژگی‌های کیفی را با حداقل دخالت انسان دارند [۱۷،۱۸]. سیستم‌های بینایی رنگی RGB کاربرد گسترده‌ای در کنترل کیفیت مواد غذایی، تشخیص عیوب و طبقه‌بندی دارد [۱۹]. با این حال دوربین‌های رنگی معمولی از شناسه‌های ضعیفی برای سطوح حساس به باندهای امواج غیر از RGB برخوردار هستند، به‌عنوان مثال قادر به تشخیص مقدار کم ولی خیلی مضر مدفوع حیوانات بر روی فراورده غذایی نمی‌باشند [۲۰،۲۱]. برای رفع این مشکل، امروزه با پیشرفت علم و فناوری، سیستم‌های تصویربرداری فراطیفی^۱ (HSI) به دلیل دقت و صحت بالا به‌عنوان روشی غیرمخرب برای ارزیابی و تشخیص در صنایع کشاورزی و غذایی کاربرد فراوان پیدا کرده است [۲۲]؛ تصویربرداری فراطیفی HSI یک فناوری جدید است که تصویربرداری و طیف‌سنجی رایج از یک جسم را برای دستیابی به اطلاعات فضایی و طیفی ادغام می‌کند. گرچه در ابتدا برای سنجش از راه دور استفاده می‌شد، اما در سال‌های اخیر به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی ایمنی و کیفیت مواد غذایی از جمله شناسایی آلاینده‌ها، تشخیص عیوب و بررسی ویژگی‌های محصولات غذایی و کشاورزی معرفی شده است [۲۳].

تصاویر فراطیفی در تشخیص تغییرات پوشش زمین و تشخیص دقیق و به‌موقع وضعیت فیزیولوژیکی محصول [۲۴،۲۵]، بررسی ویژگی‌های گیاهی مانند شاخص سطح برگ [۲۶]، طبقه‌بندی انواع محصولات [۲۷]، بازیابی زیست‌توده^۲ محصول [۲۸]، ارزیابی نیتروژن برگ [۲۹] تشخیص بیماری‌های مختلف گیاه [۳۰] و ارزیابی کیفیت و ایمنی مواد غذایی و میوه‌ها [۳۱،۳۲] به‌خوبی عمل کرده‌اند. در پژوهشی، چن و همکاران (۲۰۲۱) [۳۳]، با استفاده از تصویربرداری فراطیفی HSI تازگی ماهی هامور را بررسی کردند. در این تحقیق روش شیمی‌سنجی و مدل تجزیه و تحلیل حداقل مربعات جزئی (PLS-DA) و مدل نمونه‌برداری وزنی تطبیقی را برای طبقه‌بندی استفاده کردند. مدل PLS-DA با دقت ۱۰۰، ۹۶/۴۳ و ۹۶/۴۳ درصد به ترتیب برای

1. Hyper spectral imaging

2. Biomass

3. short-wave infrared



نمونه‌ها بر اساس گرم آب بر g ۱۰۰ نمونه مرطوب گزارش شد [۴۰].

۲.۲.۲ بافت

از آزمون TPA^۱ با استفاده از دستگاه بافت‌سنج TA.XT2i (Stable Micro Systems, Goldalming, UK) مجهز به یک بارسنج ۵ kg^۲ و پروب استوانه‌ای (قطر ۳۶ mm) برای بررسی بافت نمونه در زمان انبارمانی استفاده شد. بدین منظور پس از تهیه قطعات نان به ضخامت ۲۵ mm، نمونه تحت تأثیر پروب با سرعت آزمون ۱/۷ mm/s تا ۴۰٪ فشردگی قرار گرفتند و ویژگی‌های سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت نمونه‌ها محاسبه شد.

۳.۲.۲ ارزیابی حسی

از روش [۴۱] برای ارزیابی حسی نمونه‌ها استفاده شد. برای این منظور ویژگی‌های حسی نان از نظر شکل و فرم، ویژگی‌های سطح بالا، ویژگی‌های سطح پایین، تخلخل، سفتی بافت، قابلیت جویدن، عطر و طعم با ضریب رتبه ۴، ۳، ۲، ۱، ۲، ۳ و ۳ توسط ۱۰ ارزیاب بررسی شد. پذیرش کلی نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$Q = \frac{\sum(P \times G)}{\sum P} \quad (1)$$

Q بیانگر، پذیرش کلی، P؛ ضریب رتبه صفات و G؛ ضریب ارزیابی صفات (از بسیار بد (۱) تا بسیار خوب (۵)).

۳.۲ اخذ تصاویر فراطیفی و طبقه‌بندی بر اساس

ابرمکعب^۳

تصاویر با استفاده از یک سیستم خطی در محدوده طول موج ۴۰۰ nm تا ۹۵۰ و با وضوح کیفی ۰/۷۹۵ nm و ضبط ۶۹۲ باند در هر طیف، گرفته شدند. هر اسکن از یک نمونه شامل یک سطح تقریباً ۱۰ × ۱۰ cm، با پیکسل‌هایی با وضوح ۱۶۰ × ۴۴۸ می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در حالت انعکاس

نان اتفاق می‌افتد را فراهم می‌سازد. تصویربرداری فراطیفی، تصویربرداری شیمیایی یا تصویربرداری طیف‌سنجی یک روش تحلیلی است که اطلاعات شیمیایی به‌دست‌آمده از طیف‌سنجی را با اطلاعات فضایی سطح اندازه‌گیری شده ترکیب می‌کند [۳۷]. لذا تصویر فراطیفی نمونه حاوی مقدار زیادی اطلاعات فضایی و طیفی-شیمیایی است که معمولاً همبستگی زیادی با یکدیگر دارند [۳۸]. از این رو، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی بیاتی نان به کمک تصویربرداری فراطیفی در نظر گرفته شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تهیه نان باگت

از روش مستقیم برای تهیه خمیر نان باگت استفاده شد برای این منظور ابتدا آرد گندم، شکر ۱٪، نمک ۱٪، مخمر ۱/۵٪ و بهبوددهنده ۱/۵٪ وزنی آرد و مقدار آب لازم با هم مخلوط شدند. به‌منظور تخمیر اولیه خمیرها به مدت ۳۰ min در دمای اتاق (۲۵ °C) قرار گرفتند. برای تخمیر میانی، نمونه‌ها چانه‌گیری و به مدت ۳۰ min در بازه دمایی ۳۸-۳۰ °C استراحت کردند. در ادامه قبل از فرآیند پخت، نمونه‌ها به شکل رول به مدت ۲۰ min در دمای ۳۵ °C نگهداری شدند و سپس فرآیند پخت در دمای ۲۵۰ °C و مدت زمان ۱۵ min انجام شد. قبل از بسته‌بندی نان‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی، نمونه‌های نان باگت تا رسیدن به دمای محیط خنک شدند [۳۹].

۲.۲ بیاتی

در این پژوهش به‌منظور بررسی روند بیاتی نان باگت، از تغییرات رخ داده در ویژگی‌های فیزیکی، حسی و تصاویر فراطیفی نمونه‌ها در روزهای صفر، دوم و چهارم نگهداری در دمای اتاق استفاده شد.

۱.۲.۲ جرم و محتوای رطوبت

توزین وزن نمونه در روزهای صفر، دوم و چهارم انجام شد. از روش وزن سنجی برای تعیین محتوای رطوبتی پوسته و مغز نمونه‌ها استفاده شد. برای این منظور نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۰۵ °C خشک شدند و محتوای رطوبتی

1. Texture profile analyzer

2. Load cell

3. Hypercube

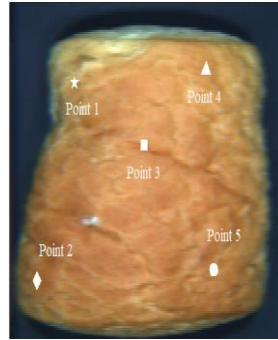
ایجاد می‌کند؛ همچنین اندازه، شکل و ویژگی‌های داخلی نمونه می‌تواند نتایج پیش‌پردازش طیفی را بیشتر منحرف کند.

بنابراین یک پنجره با ابعاد 4×4 پیکسل به‌منظور محاسبه میانگین طیف و حذف نویز بهره گرفته شد. این عملیات ممکن است وضوح فضایی را کاهش دهد ولی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. پس در ابتدا یک نسخه کاهش یافته از نمونه اصلی ایجاد و در مرحله بعدی پراکندگی سطحی طیف حاصل از نویز کاهش یافت. بعلاوه از روش هموارسازی ساویتزکی-گولای^۲ با اندازه پنجره ۱۲ نقطه در سراسر تجزیه و تحلیل داده‌ها برای برجسته‌سازی باندهای جزئی موجود در نمونه‌ها استفاده شد [۴۴]. شایان ذکر است که اندازه بهینه پنجره‌ها به‌منظور حفظ ترکیبات خالص جزئی در هر دو روش ذکر شده از طریق پایش تغییرات طیف در نمونه‌ها و روش سعی و خطا تعیین گردید. شکل (۱) نمونه‌ای از تصحیحات صورت گرفته بر روی یک تصویر نان را نشان می‌دهد. مطابق شکل (a-۱) و به‌منظور روشن نمودن عملکرد دو روش تصحیح، پنج نقطه بر روی تصویر انتخاب و طیف آن‌ها ترسیم گردید (شکل b-۱)؛ سپس میانگین طیف محاسبه و روش ساویتزکی-گولای روی آن اعمال گردید. همان‌طور که در شکل (c-۱) نشان داده شده است علاوه بر حذف نویز موجود در آن، پیک‌های باندهای جزئی موجود در نمونه‌ها نیز حفظ شده‌اند.

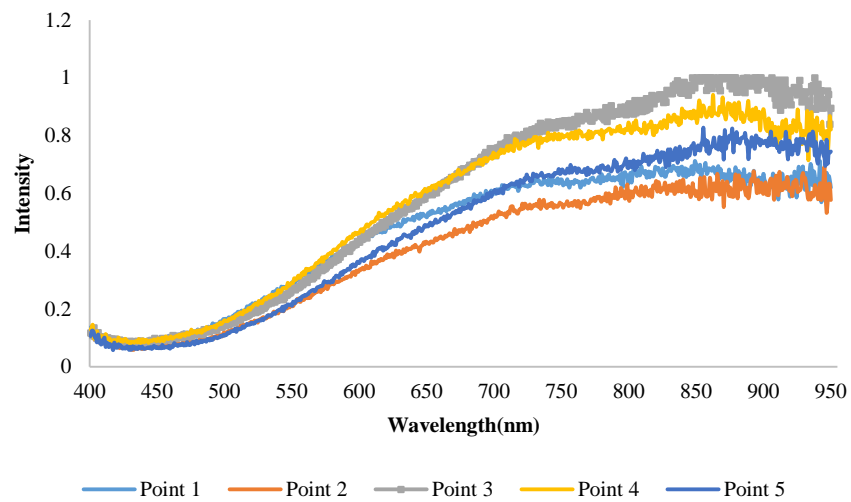
توزیع شده^۱ انجام گردید. دوربین با استفاده از طیف‌های به-دست‌آمده از صفحه طیفی 10×10 cm (حداکثر بازتاب) و طیف‌های به‌دست‌آمده از دوربین با لنزهای پوشیده شده توسط یک سطح تیره مات کالیبره شد. انعکاس توزیع شده با پیروی از روش‌های استاندارد به جذب تبدیل گردید [۴۲،۴۳]. پس از جمع‌آوری تمام تصاویر فراطیفی و مرتب کردن آن‌ها، ساختار طرح آزمایشی به‌صورت مربع‌های کوچک که نشان‌دهنده یک تصویر فراطیفی از برش‌های نان است، در آمد. هر نان دارای بیست تکرار برای هر روز نگهداری بود.

۴.۲ پیش‌پردازش ابرمکعب

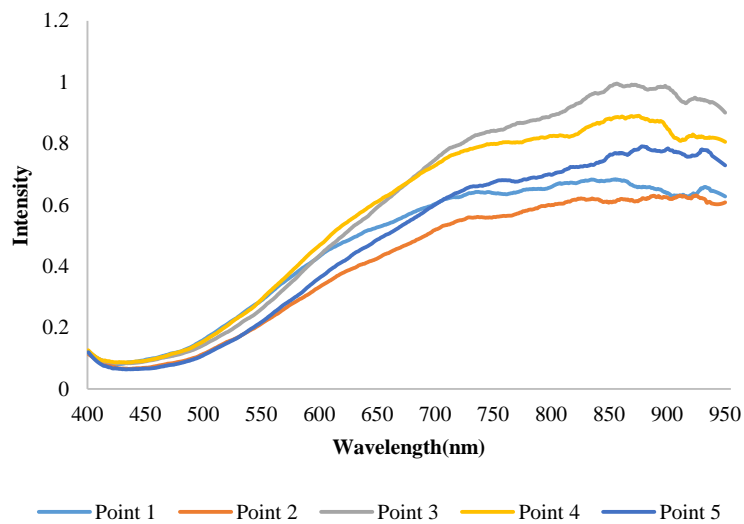
داده‌های فراطیفی به پیش‌پردازش کلی نیاز دارند تا خطاهای فضایی و طیفی موجود در باندهای فرعی طیف‌ها حذف شوند. اولین مرحله پیش‌پردازش، حذف پس‌زمینه می‌باشد. ابر مکعب را می‌توان به‌عنوان نمونه‌ای دید که در درجه اول شامل دو عنصر (برش‌های نان و پس‌زمینه) است. پس‌زمینه (سطح صفحه اندازه‌گیری دور نان) یک مقوای سیاه مات خنثی است که دارای طول موج و آستانه‌ی جذبی متفاوت با نان است که طول موج صفحه خنثی 500 nm می‌باشد که جدایی کامل بین پس‌زمینه و نان را فراهم می‌کند؛ اما ناهموازی‌ها پراکنده، سایه نامطلوب روی سطح



(a)



(b)



(c)

شکل (۱): (a) نمونه‌ای از تصویر نان با پنج نقطه انتخابی بر روی آن؛ (b) طیف مربوط به پنج نقطه قبل از تصحیح؛ (c) طیف مربوط به پنج نقطه بعد از تصحیح

Fig 1. a: An example of a bread image with five selected points on it, b: spectra corresponding to five points before correction, c: Spectra of five points after correction

۵.۲. شیمی‌سنجی

پس از پیش‌پردازش مناسب، روش‌های شیمی‌سنجی مورد استفاده، به هدف نهایی تحقیق بستگی دارد. در این مورد مکعب فراطیفی برای تغییرات در طول زمان بیات شدن نان، با استفاده از رگرسیون مؤلفه اصلی^۱ (PCR) [۴۵،۴۶] و رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۲ (PLSR) [۴۷] بررسی شدند. PCR و PLSR یکی از مؤثرترین روش‌ها در شیمی-سنجی و یادگیری ماشین است، زیرا با فرضیات کم، به درک منابع اصلی واریانس در یک مجموعه کمک می‌کند. پیش-بینی مکعب فراطیفی با PCR و PLSR به ما کمک می‌کند تا اثرات مختلف بر روی سطح تکه نان به‌طور همزمان بررسی و ارزیابی شوند و بار PCA و PLSR نیز حاوی دلایل طیفی آن اثر است [۴۸]. در این پژوهش به‌منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو قسمت (۸۰٪ نمونه‌ها برای آموزش و اعتبارسنجی و متقاطع و ۲۰٪ جهت آزمون) تقسیم شدند. همچنین به‌منظور ارزیابی دقت این مدل‌ها از شاخص‌های ضریب تشخیص (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) استفاده گردید (رابطه ۲-۳). یک مدل خوب با داشتن کم‌ترین RMSE و داشتن بیشترین R^2 تعیین می‌شود [۴۹].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_p - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_r - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_r - y_p)^2}{N}} \quad (3)$$

y_r مقدار محاسبه واقعی آزمایش، y_p مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، \bar{y} میانگین مقادیر آزمایشی و N تعداد کلی داده‌ها می‌باشد.

۵.۲.۱. شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته^۴

بعد از استخراج مؤلفه‌های اصلی، به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی از مدل شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته استفاده شد. شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN) یکی از انواع شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی^۵ است. مزیت این روش نسبت به سایر شبکه‌های عصبی داشتن ساختار احتمالاتی است که سبب می‌شود در مسائل رگرسیون و در زمان مدل‌سازی با مشکل کمینه‌های محلی مواجه نگردند. این شبکه عصبی سه لایه بوده و تعداد نرون‌های موجود در لایه اول و آخر مشابه دیگر شبکه‌های عصبی است اما تعداد نرون‌ها در لایه میانی برابر با تعداد مشاهدات می‌باشد. در این شبکه یک تابع احتمالاتی گوسی برای هر یک از نرون‌ها در لایه میانی وجود دارد که به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد [۵۰]:

$$f_i = \exp\left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2}\right] \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

که در این رابطه X ورودی به شبکه عصبی با خروجی نامشخص، X_i مقدار داده در مرحله آموزش و σ میزان پراکندگی توابع پایه شعاعی که مقدار این پارامتر به روش سعی و خطا و پایش مقدار خطای خروجی تنظیم گردید [۵۱].

برای آموزش، ابتدا داده‌ها به‌طور تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند، به‌طوری‌که دو-سوم داده‌ها برای آموزش، یک-سوم آن‌ها برای آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. ورودی مدل مقادیر سه مؤلفه اصلی و خروجی آن ویژگی‌های بافتی استخراج شده از دستگاه بافت‌سنج بودند.

۶.۲. نرم‌افزار

تمامی پردازش‌ها در نرم‌افزار MATLAB 2022b و SAS انجام پذیرفت.

1. principal component analysis
2. partial least square
3. Root Mean Square Error of Validation

4. Generalized regression neural network
5. Radial Basis Function

۳. نتایج و بحث

گزارش شده توسط انحوجی و کروبی (۲۰۱۸) [۵۴] در یک راستا می‌باشد که کاهش معنی‌دار ارتجاعیت ($p < 0.05$) در طی مدت زمان نگهداری دو نوع کیک (تولید شده از دو نوع روغن پالم و کلزا) را نیز مشاهده نمودند و علت تغییر این ویژگی را پایداری و یکنواختی توزیع حباب‌های هوا در ماتریس دمای ۲۰ درجه سلسیوس و ۶۵ درصد رطوبت نسبی گزارش نمودند. همچنین در پژوهش دیگری [۵۵] با استفاده از جاذب اکسیژن در کیک‌ها کاهش مقدار ارتجاعیت آن‌ها را در طی انبارمانی مشاهده نمودند که در روزهای اول، سوم و ششم بیشترین مقدار ارتجاعیت ۳۳/۳۸ درصد و مربوط به تازه‌ترین کیک‌ها بود و طبق نظر آنها استفاده از جاذب اکسیژن اجازه نمی‌دهد که سطح اولیه ارتجاعیت در طول زوال حفظ شود؛ زیرا نقش جاذب اکسیژن در طول انبارمانی تنها حذف اکسیژن موجود در اطراف نمونه‌های کیک تا حد امکان بود. نتایج حاصل از تحقیق آذراباد و همکاران (۱۳۹۵) [۵۶]، نشان می‌دهد که بیشترین مقدار خاصیت ارتجاعی بافت نان در نمونه شاهد (آرد دارای گلوتن) در روز اول تولید می‌باشد که با گذشت زمان روند کاهشی ارتجاعیت را مشاهده نمودند؛ که علت این کاهش را مقدار گلوتن که شامل پروتئین‌های گلیادین (کشش‌پذیرند و وظیفه ویسکوز بودن و پیوستگی خمیر را دارند) و گلوتمین (در مقابل کشش مقاومت می‌کنند و وظیفه قابلیت کشش و خاصیت ارتجاعی خمیر را دارند) می‌باشد را گزارش نمودند.

نتایج تجزیه و تحلیل بافت نان در جدول (۱) نشان داده شده است. بیات شدن مغز نان، پدیده‌ی پیچیده‌ای است و نظریه‌های زیادی برای عوامل مؤثر این فرایند مطرح و مورد بحث واقع شده است؛ که از جمله این عوامل می‌توان به نقش مهم واگستگی نشاسته (به‌ویژه واگستگی آمیلوپکتین، علی‌رغم اینکه به‌طور مستقیم مسئول بیات شدن نان نیست)، نقش پروتئین‌های گلوتن و برهمکنش‌های گلوتن-نشاسته، دمای نگهداری، مهاجرت رطوبت، توزیع مجدد رطوبت مغز-پوسته و توزیع مجدد رطوبت بین اجزاء اشاره نمود [۵۲]. در دوره نگهداری رطوبت از مغز به پوسته نان انتقال می‌یابد بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته پوسته به‌راحتی تا ۴۵٪ رطوبت را از مغز نان جذب می‌کند [۵۲]؛ همچنین بر اساس مشاهدات صورت گرفته، طی یک دوره نگهداری ۱۰۰ ساعته، رطوبت پوسته ممکن است تا ۲۸٪ نیز افزایش یابد [۵۳]. این مسئله سبب کاهش رطوبت مغز نان و همچنین افزایش سفتی آن به سبب انتقال رطوبت می‌گردد. همان‌گونه که در نتایج این مطالعه مشاهده می‌شود، طی شش روز نگهداری، جرم و رطوبت مغز روند کاهشی معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد داشتند؛ در حالی که در رطوبت پوسته و سفتی در خلال انبارمانی روند افزایشی معنی‌داری مشاهده گردید ($p < 0.05$). ارتجاعیت نیز روند کاهشی معنی‌داری بر خلاف پیوستگی از خود نشان داد که این یافته‌ها با نتایج

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.

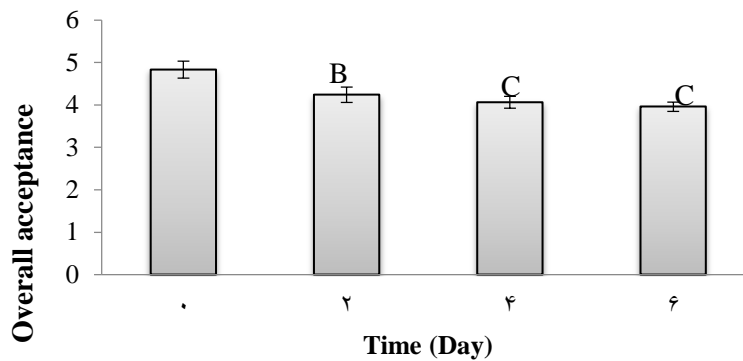
پارامترهای اندازه گیری شده							
Measured Parameters							
زمان (روز) Time (day)	جرم (گرم) Mass (gram)	رطوبت مغز (%) Crumb moisture (%)	رطوبت پوسته (%) Crust Moisture (%)	پیوستگی Cohesiveness	ارتجاعیت (%) Springiness (%)	قابلیت جویدن Chewiness	سفتی (N) Firmness (N)
Zero day	97.98 ^a	47.81 ^a	14.78 ^c	0.78 ^a	55.39 ^a	201.35 ^c	4.08 ^c
Second day	94.74 ^a	40.62 ^b	19.86 ^b	0.59 ^b	51.91 ^{ab}	381.41 ^b	8.15 ^b
Fourth day	76.03 ^b	38.94 ^{bc}	26.08 ^a	0.48 ^c	44.20 ^c	423.34 ^a	12.22 ^a
Sixth day	75.87 ^b	34.07 ^c	25.98 ^a	0.44 ^c	42.77 ^c	435.28 ^a	12.53 ^a

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

حروف مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی داری است ($p < 0.05$).

طی مدت زمان ماندگاری به دلیل انتقال رطوبت از مغز به پوسته نان، بافت پوسته حالت سفت و چرمی پیدا می‌کند که همین امر سبب کاهش رنگ و تردی نمونه‌ها نیز می‌شود.

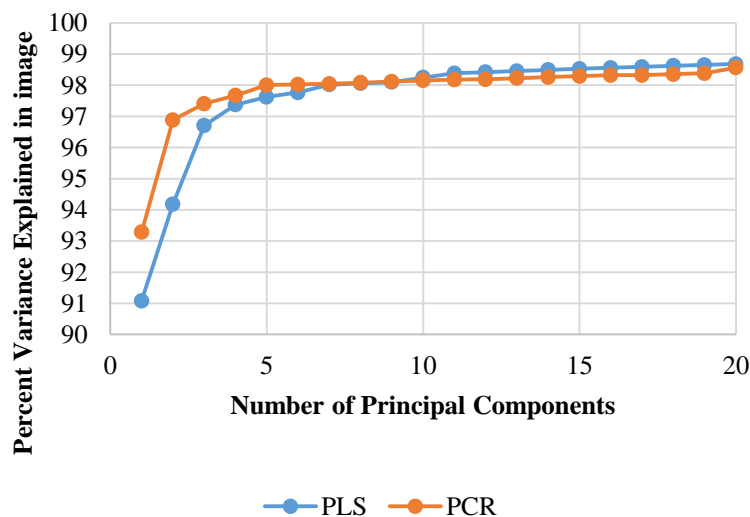
نتایج ارزیابی حسی نمونه‌های نان باگت نشان داد با افزایش مدت زمان ماندگاری، میزان پذیرش کلی نمونه‌ها نیز کاهش یافت (شکل ۲). یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش پذیرش کلی نمونه در طی مدت زمان ماندگاری، بیاتی شدن می‌باشد. در



شکل (۲) پذیرش کلی نان باگت از نظر مصرف‌کننده در روزهای مختلف نگهداری
Fig 2. Customer general acceptance of the baguette bread in different storage days

اصلی چهارم به بعد تصاویر حاوی اطلاعات مفیدی نبودند؛ لذا در تحلیل و توسعه مدل‌های رگرسیونی از سه مؤلفه اصلی اول استفاده گردید. میزان واریانس روش PCR نسبت به روش PLS بیشتر بود که این روند با پژوهش‌های [۵۷،۵۸] مطابقت دارد.

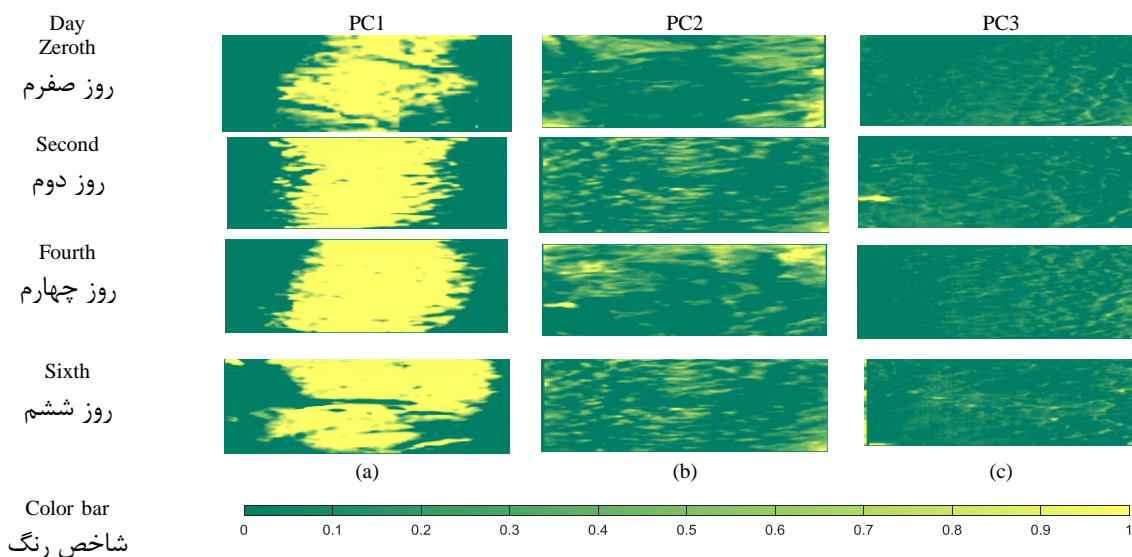
به‌منظور تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی که حاوی بیشتر اطلاعات موجود در تصاویر هستند، نمودار تعداد مؤلفه‌های اصلی نسبت به درصد واریانس موجود در هر مؤلفه اصلی به‌صورت تجمعی ترسیم گردید. همانطور که در شکل (۳) مشخص است در هر دو روش PCR و PLS درصد واریانس در ۳ مؤلفه اصلی بیش از ۹۶٪ گردیده است. بعلاوه از مؤلفه



شکل (۳) نمودار بیست مؤلفه اصلی برحسب درصد واریانس
Fig 3. Graph of twenty principal components in terms of percentage of variance

های آن بیشتر بود و با گذشت زمان از روز صفرم تا روز ششم رشد ناحیه با مقادیر بالاتر از ۰/۸ از ۰/۵۱ به ۰/۸۹ رسید (شکل ۴-ا). مؤلفه اصلی دوم و سوم به ترتیب حاوی ۳/۱ و ۲/۵٪ از اطلاعات موجود از تصویر می‌باشند.

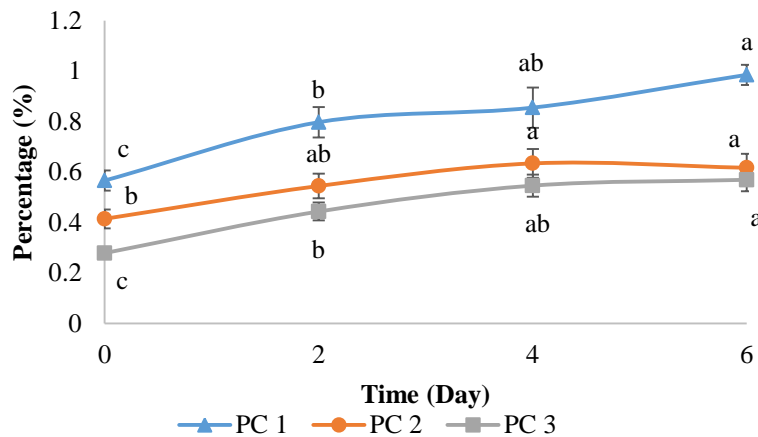
نتایج مقادیر و بار سه مؤلفه اصلی برای نان باگت طی شش روز انبارمانی در شکل (۴) نشان داده شده است. مؤلفه اصلی اول بیش از ۹۱٪ کل واریانس را به خود اختصاص می‌دهد؛ مقادیر این مؤلفه برای نان در قسمت مرکزی نسبت به کنار-



شکل (۴) تصویر (a) مؤلفه اصلی اول؛ (b) مؤلفه اصلی دوم؛ (c) مؤلفه اصلی سوم از یک نمونه نان طی ۶ روز انبارمانی
Fig 4. image a) of the first principal component, b) of the second principal component, c) of the third principal component of a bread sample during 6 days of storage

این ویژگی‌ها به ترتیب ۵۷، ۴۱ و ۲۸ درصد بودند و در روز آخر انبارمانی به ترتیب ۹۸، ۶۱ و ۵۷ درصد گردیدند. این مسئله نشان‌دهنده یک روند افزایشی معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۵٪ برای هر سه مؤلفه اصلی در خلال انبارمانی بود؛ این یافته‌ها کاملاً با اندازه‌گیری‌های دستگاه آزمون بافت (TPA) همخوانی دارد (جدول ۱). بعلاوه این نتایج با داده‌های ارائه شده در تحقیق آمیگو و همکاران (۲۰۱۹) [۵۹] مطابقت دارند.

در نگاه اول، همان‌طور که در تصاویر مؤلفه اصلی دوم و سوم مشخص است (شکل ۴- b و c)، این تصاویر حاوی اطلاعات مفیدی نمی‌باشد؛ لذا نیاز به بررسی بیشتر و کمی‌سازی این مقایسه، استخراج ویژگی مناسب از این تصاویر لازم است. بدین منظور درصد مؤلفه‌های مثبت برای هر تصویر طی شش روز انبارمانی محاسبه و ترسیم گردید (شکل ۵). همان‌طور که در شکل (۵) آمده است با افزایش انبارمانی نان درصد مؤلفه‌های مثبت برای هر ۳ مؤلفه اصلی روند افزایشی داشته است؛ به‌طوری که برای PC1، PC2 و PC3 در روز اول



شکل (۵) درصد پیکسل‌های مثبت نسبت طی ۶ روز نگهداری برای نان
 Fig 5. the percentage of positive pixels with respect to six days of storage time for bread

وجود دارد. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است مقادیر مثبت مؤلفه‌های اصلی دوم و سوم ارتباط قوی‌تری با سفتی، پیوستگی و ارتجاعیت نسبت به مقادیر مثبت مؤلفه‌های اصلی اول دارند که نشان دهنده وجود اطلاعات مفید علاوه بر عدم نمایش در تصاویر شکل (۴) در این دو مؤلفه می‌باشد.

مطابق جدول (۲) یک ارتباط قوی معنی‌داری میان درصد مقادیر مثبت مؤلفه‌های اصلی با سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت بافت درونی نان وجود دارد. بر اساس جدول همبستگی پیرسون میان سفتی و قابلیت جویدن با مقادیر مثبت مؤلفه‌های اصلی یک ارتباط مستقیم و میان پیوستگی و ارتجاعیت با این مقادیر یک ارتباط معکوس

جدول (۲) ضرایب همبستگی بین درصد پیکسل‌های مثبت در سه مؤلفه اصلی اول در تصاویر و متغیرهای بافتی.

Table 2. Correlation coefficients between the percentage of positive pixels in the first three PCs of images and texture feature.

Texture feature	درصد پیکسل‌های مثبت		
	PC 1	PC 2	PC 3
Firmness	0.94**	0.99**	0.99**
Chewiness	0.97**	0.90*	0.94**
Cohesiveness	-0.97**	-0.98**	-0.99**
Springiness	-0.86*	-0.93*	-0.89*

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

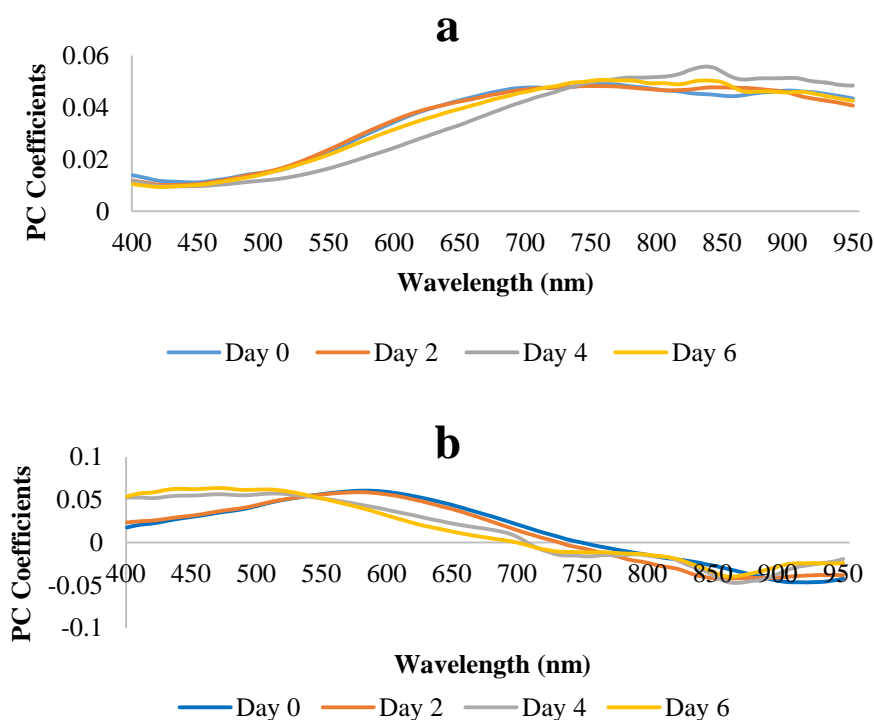
* و ** به ترتیب در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۰۱ همبستگی معنی دار را نشان می‌دهند.

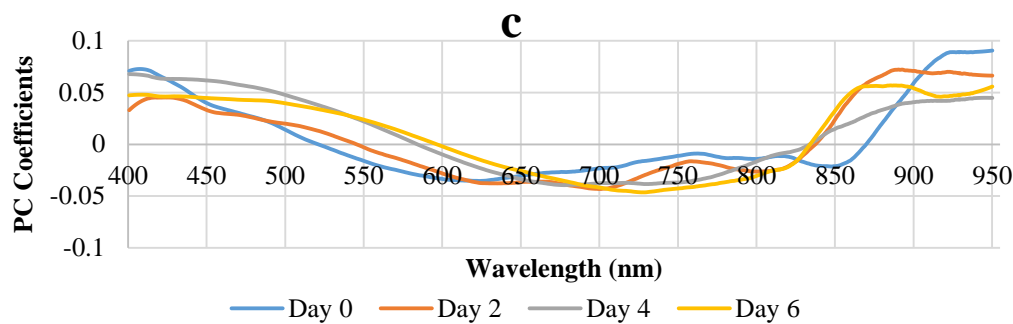
علت وجود آب (اورتون سوم کشش پیوند O-H) و کربوهیدرات (اورتون سوم پیوند C-H) که جذب بالایی در ناحیه ۹۵۸ nm [۶۰] و ۹۳۵ nm دارند، باشد [۶۱]. این نواحی نشان می‌دهد که اطلاعات اولیه موجود در نمودار مؤلفه اصلی اول به دلیل وجود آب‌های تا حدودی متحرک است که با گذشت زمان به حالت پایدار درمی‌آید. بر اساس

به‌منظور بررسی نواحی طیفی مختلف حاصل از این سه مؤلفه‌ای نمودار بارگذاری برای آن‌ها طی شش روز انبارمانی ترسیم گردید (شکل ۶). مطابق با شکل (۶-a)، از ۴۰۰-۵۱۰ نمودار بارگذاری تا حدودی ثابت است تا زمانی که یک پیک در محدوده در ۷۵۰-۸۰۰ و همچنین ۸۵۰-۹۰۰ مشاهده می‌گردد؛ این پیک‌ها به ترتیب به احتمال زیاد به

۸۶۰ nm و دیگری در ۹۲۰ nm نیز مشاهده می‌شود که پیک اول می‌تواند به اورتون دوم کشش پیوند N-H مرتبط باشد و پیک دوم مربوط به پیوند O-H می‌باشد [۶۲]. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که اطلاعات موجود در مؤلفه اصلی دوم مربوط به پروتئین‌های نان است که با آب واکنش دارند و انعطاف‌پذیری مغز نان را حفظ می‌کنند. نهایتاً چندین طول موج مختلف در ناحیه مرئی و فرورسرخ نزدیک که دارای مشارکت در مقادیر بارگذاری طیف طی انبارمانی هستند شناسایی شدند. این طول موج‌ها شامل ۴۲۳، ۴۷۰ و ۶۱۸ در ناحیه مرئی و ۷۱۵، ۷۶۸، ۸۵۰، ۸۹۴ و ۹۲۷ در ناحیه فرورسرخ نزدیک می‌باشند. پیک‌ها نشان‌دهنده ارتعاش کششی پیوندهای O-H، C-H هستند که با مقادیر نشاسته دست نخورده یا همان آمیلوپکتین ژلاتینه شده در ارتباط می‌باشند؛ بنابراین نمودار بارگذاری مؤلفه اصلی سوم نشان دهنده تغییرات ساختار نشاسته در طول فرایند بیات شدن است.

نمودار بارگذاری مؤلفه اصلی دوم (شکل ۶-b) برای نان تازه (روز صفر و روز دوم انبارمانی) یک پیک در حوالی ۴۳۰ nm مشاهده می‌شود در حالی که برای نان کهنه در این محدوده بارگذاری مؤلفه اصلی دوم کمترین حالت خود را دارد؛ این مسئله نشان‌دهنده تجمع محصولات واکنش میلارد مانند بازهای شیف^۱ در طول ذخیره‌سازی نان است. این مشاهده مطابق با یافته‌های بوتوسوآ و همکاران (۲۰۱۳) [۵۵] که اشاره کردند جذب بازهای شیف تولیدشده توسط واکنش آلدئیدهای مشتق شده از لیپید و گروه‌های آمینه باقیمانده-های پروتئین‌های لیزین در محدود ۴۷۰ nm بیشترین مقدار را دارد، در یک راستا می‌باشد. یک روند معکوس در حوالی ۵۸۵ nm قابل رؤیت است به طوری برای نمونه‌های تازه بارگذاری مؤلفه اصلی دوم بیشترین مقدار (یعنی ۰/۰۵۸) و برای نان‌ها کهنه کمترین (یعنی ۰/۰۴) مقدار را داشت. به احتمال زیاد این پیک مربوط به تغییر رنگ نان و اثر انبارمانی بر آن است. علاوه بر موارد یاد شده یک پیک در





شکل (۶) نمودار بارگذاری سه مؤلفه الی در خلال انبارمانی (a) مؤلفه اصلی اول؛ (b) مؤلفه اصلی دوم؛ (c) مؤلفه اصلی سوم
Fig 6. loading diagram of three components during storage a) the first main component, b) the second principal component, c) third principal component

تعیین ۰/۹۱، ۰/۷۳، ۰/۶۷ و ۰/۶۵، پیش‌بینی نمودند. همچنین در پژوهشی دیگر [۶۳] با استفاده از طیف‌سنجی MIR موفق به پیش‌بینی سفتی ($R^2 = 0.77$) و پیوستگی ($R^2 = 0.81$) در بافت پنیر شدند. نتایج تحقیق دیگری [۶۴] نشان داد که طیف‌سنجی NIR قادر به بازتاب فرایند خشک شدن و تمایز بین سطوح مختلف رطوبتی نان است. در این پژوهش از روش تخمین لحظه خشک شدن با مقادیر $\leq 3\%$ RMSE و $R^2 \geq 0.937$ صورت پذیرفت. دقت روش‌های اشاره‌شده در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نسبت به روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر کمتر می‌باشد. علت این مسئله می‌تواند به‌کارگیری اطلاعات تصویری و طیفی در پیش‌بینی در روش دوربین فراطیفی نسبت به روش طیف‌سنجی دانست.

جدول (۳) نتایج مربوط به مدل‌سازی سه روش PCR، PLSR و GRNN به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان طی شش روز نگهداری را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج روش GRNN نسبت به دو روش دیگر دارای بیشترین مقادیر R^2 و همچنین کمترین خطا می‌باشد. در روش GRNN کمترین مقدار خطا برای دو ویژگی، پیوستگی و سفتی به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۲ مشاهده شد؛ که نشان‌دهنده توانایی مدل شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان است. روش PLSR نیز از خروجی قابل قبولی برخوردار بود و نسبت به روش PCR عملکرد بهتری در پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی نان با خطای کمتر و ضریب تعیین بالاتری داشت. در پژوهشی [۴۹] با استفاده از طیف‌سنجی MIR و روش PLSR میزان سفتی، ارتجاعیت، پیوستگی و انعطاف‌پذیری بافت کیک را به ترتیب با ضریب

جدول (۳) نتایج مربوط به پیش‌بینی ویژگی‌های بافتی

Table 3. Prediction evaluation of textural characteristics

		ویژگی‌های بافتی Textural Characteristics							
روش پیش‌بینی Prediction Method	شاخص‌های ارزیابی Evaluation Characteristics	سفتی Firmness		قابلیت جویدن Chewiness		پیوستگی Cohesiveness		ارتجاعیت Springiness	
		آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test
		PCR	R^2	0.85	0.77	0.81	0.79	0.83	0.83
RMSE	1.31		1.81	10.04	10.39	0.17	0.15	1.95	1.89
PLSR	R^2	0.89	0.86	0.84	0.82	0.86	0.85	0.90	0.88
	RMSE	1.17	1.14	8.09	8.58	0.11	0.11	1.81	1.93
GRNN	R^2	0.97	0.94	0.89	0.84	0.91	0.91	0.95	0.96
	RMSE	0.61	0.32	11.07	11.43	0.12	0.11	1.37	1.29

۴. نتیجه‌گیری

۴۳۰ nm مشاهده شد که نشان‌دهنده تجمع محصولات واکنش میلارد مانند بازهای شیف در طول ذخیره‌سازی نان است؛ همچنین یک روند معکوس در حوالی ۵۸۵ nm مشاهده شد که به احتمال زیاد این پیک مربوط به تغییر رنگ نان و اثر انبارمانی بر آن است. علاوه بر موارد یاد شده یک پیک در ۸۶۰ nm شد که می‌تواند به اورتون دوم کشش پیوند N-H مرتبط باشد شناسایی گردید. در نهایت مشخص گردید که روش تصویربرداری فرایلی روشی کارآمد در ارزیابی و تشخیص فرایند بیاتی در پیش‌گویی ویژگی‌های بافتی آن طی انبارمانی است.

تشکر و قدردانی

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

در پژوهش حاضر فرآیند بیاتی نان به کمک تصویربرداری فرایلی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از اطلاعات تصویری و طیفی و به‌کارگیری مدل تجزیه و تحلیل‌های GRNN، PCR و PSLR به پیش‌گویی ویژگی‌های بافتی نان (سفتی، قابلیت جویدن، پیوستگی و ارتجاعیت) طی شش روز انبارمانی پرداخته شد. با توجه به خطای کمتر روش GRNN در پیش‌گویی ویژگی‌های ذکر شده نسبت به روش دیگر، این روش عملکرد بهتری از خود نشان داد. بررسی نواحی طیفی مختلف طی شش روز انبارمانی نشان داد که پیک موجود در محدوده در ۷۵۰-۸۰۰ و همچنین ۸۵۰-۹۰۰ به احتمال زیاد به علت وجود آب (اورتون سوم کشش پیوند O-H) و کربوهیدرات (اورتون سوم پیوند C-H) است. در روز صفر و روز دوم انبارمانی یک پیک در حوالی

منابع

- [1] Aguirre, J. F., Osella, C. A., Carrara, C. R., Sanchez, H. D., & Buera, M. D. P. (2011). Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch/Staerke*, 63(9), 587-593.
- [2] Gray, J. A., & Bemiller, J. N. (2003). Bread staling: Molecular basis and control. *CRFSFS.*, 2(1), 1-21.
- [3] Ribotta, P.D., & Le-Bail, A. (2007). Thermophysical assessment of bread during staling. *LWT.*, 40(5), 879-884.
- [4] Edel León, A., Durán, E., & De Barber, C. (2002). Utilization of Enzyme Mixtures to Retard Bread Crumb Firming. *Agric. Food Chem.*, 50(6), 1416-9.
- [5] Ribotta, P. D., Leon, A. E., & Anon, M. C. (2003). Effect of freezing and frozen storage on the gelatinization and retrogradation of amylopectin in dough baked in a differential scanning calorimeter. *Food Res. Int.* 36, 357-363.
- [6] Aguirre, J.F., Osella, C.A., Carrara, C.R., Sanchez, H.D., & Buera, M.P. (2011). Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch - Starke*, 63(9), 587-593.
- [7] Gray, J. A., & Bemiller, J. N. (2003). Bread Staling: Molecular Basis and Control. *CRFSFS.*, 2(1), 1-21.
- [8] Marinopoulou, A. Petridis, D., & Raphaelides, S.N. (2019). Assessment of texture changes in sliced pan bread on aging using sensory and instrumental method. *Food Process. Preserv.*, 43(2), 13982.
- [9] Chen, Y., Eder, S., Schubert, S., Gorgerat, S., Boschet, E., Baltensperger, L., Boschet, E., Städeli, Ch., Kuster, S., Fischer, P., & Windhab, E.J. (2021). Influence of Amylase Addition on Bread Quality and Bread Staling. *ACS Food Sci. Technol.*, 1(6), 1143-1150.
- [10] Xie, F., Dowell, F., & Sun, X. (2003). Comparison of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy and Texture Analyzer for Measuring Wheat Bread Changes in Storage. *Cereal Chem.*, 80(1), 25-29.
- [11] 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. *Food Qual.*, 18(1), 1-9.
- [12] Nouri, M., Nasehi, B., Goudarzi, M., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018). Non-destructive Evaluation of bread Staling Using Gray Level Co-occurrence Matrices. *Food Anal. Methods*, 11(2).
- [13] 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. *Food Sci. Technol.*, 117, 108665.
- [14] Abdanan Mehdizadeh, S., & Nouri, S. F. (2022). Development of a non-destructive method to determine the textural characteristics of baguette bread using a Doppler laser vibrometer sensor. *Innovative Food Technol.*, 10(1), 69-85. [In Persian]

- [15] Scotter, C. (1990). Use of near infrared spectroscopy in the food industry with particular reference to its applications to on/in-line food processes. *Food Control*, 1(3), 142-149.
- [16] Ariana, D., Lu, R., & Guyer, D. E. (2006). Hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on pickling cucumbers. *Comput. Electron. Agric.*, 53(1), 60-70.
- [17] Brosnan, T., & Sun, D. W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision: a review. *Food Eng.*, 61(1), 3-16.
- [18] Du, C. J., & Sun, D. W. (2004). Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluations. *Trends in Food Sci. Technol.*, 15, 230-249.
- [19] Chao, K., Chen, Y. R., Early, H., & Park, B. (1999). Color image classification systems for poultry viscera inspection. *Appl. Eng. Agric.*, 15(4), 363-369.
- [20] Liu, Y., Chen, Y. R., Kim, M. S., Chan, D. E., & Lefcourt, A. M. (2007). Development of simple algorithms for the detection of fecal contaminants on apples from visible/near infrared hyperspectral reflectance imaging. *Food Eng.*, 81(2), 412-418.
- [21] Park, B., Lawrence, K. C., Windham, W. R., & Smith, D. (2006). Performance of hyperspectral imaging system for poultry surface fecal contaminant detection. *Food Eng.*, 75(3), 340-348.
- [22] Lu, B., Dao, Ph., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. *Remote Sens.*, 12(16), 2659.
- [23] Gowen, A.A., O'Donnell, P.J., C.P., Downey, C.G., & Frias, J.M. (2007). Hyperspectral imaging an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Sci. Technol.*, 18, 590-598.
- [24] Lucieer, A., Malenovsky, Z.; Veness, T., & Wallace, L. (2014). HyperUAS-imaging spectroscopy from a multirotor unmanned aircraft system. *Field Robot.*, 31, 571-590.
- [25] Gonzalez-Dugo, V., Hernandez, P., Solis, I., & Zarco-Tejada, P. (2015). Using High-Resolution Hyperspectral and Thermal Airborne Imagery to Assess Physiological Condition in the Context of Wheat Phenotyping. *Remote Sens.*, 7, 13586-13605.
- [26] Lee, K., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Maiersperger, T.K., & Gower, S.T. (2004). Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sens. Environ.*, 91, 508-520.
- [27] Mariotto, I., Thenkabail, P.S., Huete, A., Slonecker, E.T., & Platonov, A. (2013). Hyperspectral versus multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HypSPRI mission. *Remote Sens. Environ.*, 139, 291-305.
- [28] Marshall, M., & Thenkabail, P. (2015). Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation. *ISPRS J. Photogramm.*, 108, 205-218.
- [29] Sun, J., Yang, J., Shi, S., Chen, B., Du, L., Gong, W., & Song, S. (2017). Estimating Rice Leaf Nitrogen Concentration: Influence of Regression Algorithms Based on Passive and Active Leaf Reflectance. *Remote Sens.*, 9, 951.
- [30] Mahlein, A.K., Steiner, U., Hillnhütter, Ch., Dehne, H.W., & Oerke, E.C. (2012). Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods*, 8(1), 3.
- [31] Balasundaram, D., Burks, T.F., Bulanon, D.M., Schubert, T., & Lee, W. (2009). Spectral reflectance characteristics of citrus canker and other peel conditions of grapefruit. *Postharvest Biol. & Tec.*, 51, 220-226.
- [32] Qin, J., Burks, T.F., Ritenour, M.A., & Bonn, W. (2009). Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence. *Food Eng.*, 93, 183-191.
- [33] Chen, Z., Wang, Q., Zhang, H., & Nie, P. (2021). Hyperspectral Imaging (HSI) Technology for the Non-Destructive Freshness Assessment of Pearl Gentian Grouper under Different Storage Conditions. *Sensors*, 21(2), 583.
- [34] Saleem, Z., Hussain Khan, M., Ahmad, M., Sohaib, A., Ayaz, H., & Mazzara, M. (2020). Prediction of Microbial Spoilage and Shelf-Life of Bakery Products Through Hyperspectral Imaging. *IEEE Access*, 8.
- [35] Sricharoonratana, M., Thompson, A., & Teerachaichayut, S. (2021). Use of near infrared hyperspectral imaging as a nondestructive method of determining and classifying shelf life of cakes. *LWT*, 136(2), 110369.
- [36] Kim, G., Lee, H., Baek, I., Cho, B., & Kim, M. (2022). Short-Wave Infrared Hyperspectral Imaging System for Nondestructive Evaluation of Powdered Food. *Biosyst. Eng.*, 47(2), 223-232.
- [37] Savage, S. H., Levy, T. E., & Jones, I. W. (2012). Prospects and problems in the use of hyperspectral imagery for archaeological remote sensing: A case study from the Faynan copper mining district. *Jordan. Archaeologic Sci.*, 39(2), 407-420.
- [38] Vidal, M., & Amigo, J. M. (2012). Pre-processing of hyperspectral images. Essential steps before image analysis. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 117, 138-148.
- [39] Joleini, M., GhiafeDawoodi, M., & Sheikholeslami, Z. (2016). Effect of flaxseed addition

- on nutritional properties and shelf life of Berber bread. *innovation in Food sci, Technol.*, 9(3), 1-11. [In Persian]
- [40] AACC (American Association of Cereal Chemists). (2000). Method 44-19, Moisture, Approved Methods. MN, USA: St Paul.
- [41] Sahraiyani, B., Mazaheri Tehrani, M., Naghipour, F., Ghiafeh Davoodi, M., & Soleimani, M. (2013). The effect of mixing wheat flour with rice bran and soybean flour on physicochemical and sensory properties of baguettes. *Iranian J. Nutrition Sci. Food Technol.*, 8(3), 229-240. [In persian]
- [42] Burger, J., & Geladi, P. (2005). Hyperspectral NIR image regression part I: Calibration and correction. *Chemometrics*, 19, 355–363.
- [43] Burger, J., & Geladi, P. (2006). Hyperspectral NIR image regression part II: Dataset preprocessing diagnostics. *Chemometrics*, 20(3-4), 106–119.
- [44] Aviara, N. A., Liberty, J. T., Olatunbosun, O. S., Shoyombo, H. A., & Oyeniyi, S. K. (2022). Potential application of hyperspectral imaging in food grain quality inspection, evaluation and control during bulk storage. *Agric. Food Res.*, 100288.
- [45] Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). Principle component analysis. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 2: 37-52.
- [46] Bro, R., & Smilde, A. K. (2014). Principal component analysis (Tutorial Review). *Analytical Methods*. 6(9), 2812–2831.
- [47] De Juan, A., Piqueras, S., Maeder, M., Hanczewicz, T., Duponchel, L., & Tauler, R. (2014). Chemometric Tools for Image Analysis. R, Salzer, H.W. Siesler (Eds). In: *Infrared and Raman Spectroscopic Imaging* (2nd ed., pp. 57–110). Publisher: Wiley-VCH.
- [48] Wold, S., Sjostrom, M., & Eriksson, L. (2001). PLS-regression: A basic tool of chemometrics. *Chemom.Intell. Lab. Syst.*, 58(2), 109–130.
- [49] Soltani Kazemi, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Heidari, M., & Faregh, S. M. (2017). Predict changes of some quality parameters of black mulberry juice (*Morusnigra* L.) during ripening using machine vision and fractal analysis. *Iranian Food Sci. Technol. Res. J.*, 13(5), 730-743.
- [50] Salehi, M., Farhadi, S., Moieni, A., Safaie, N., & Hesami, M. (2021). A hybrid model based on general regression neural network and fruit fly optimization algorithm for forecasting and optimizing paclitaxel biosynthesis in *Corylus avellana* cell culture. *Plant Methods*, 17, 1-13.
- [51] Xu, X., Chen, S., Ren, L., Han, C., Lv, D., Zhang, Y., & Ai, F. (2021). Estimation of heavy metals in agricultural soils using vis-NIR spectroscopy with fractional-order derivative and generalized regression neural network. *Remote Sens.*, 13(14), 2718.
- [52] Melini, V., & Melini, F. (2018). Strategies to Extend Bread and GF Bread Shelf-Life: From Sourdough to Antimicrobial Active Packaging and Nanotechnology. *Fermentation*, 4(1).
- [53] Pateras, I.M.C. (1998). Bread spoilage and staling. *Technology of Breadmaking*, 240–261.
- [54] Nhouchi, Z., & Karoui, R. (2018). Application of Fourier-transform mid infrared for the monitoring of pound cakes quality during storage. *Food Chem.*, 252, 327-334.
- [55] Botosoa, E.P., Christine, C., & Karoui, R. (2013). Monitoring Changes in Sponge Cakes during Aging by Front Face Fluorescence Spectroscopy and Instrumental Techniques. *Agric. Food Chem.*, 61(11), 2687-2695.
- [56] AzarBad, H., Mzaheri, M., & Rashidi, H. (2016). Determination of chemical, sensory and mechanical texture characteristics of reduced gluten Barbari bread made from Wheat flour and Millet flour blend. *Food Res. (Agric. sci.)*, 26(1), 139-149. [In persian].
- [57] Mehdizadeh, S. A., Minaei, S., Hancock, N. H., & Torshizi, M. A. K. (2014). An intelligent system for egg quality classification based on visible-infrared transmittance spectroscopy. *Inf. Process. Agric.*, 1(2), 105-114.
- [58] Guo, S., Rösch, P., Popp, J., & Bocklitz, T. (2020). Modified PCA and PLS: Towards a better classification in Raman spectroscopy-based biological applications. *Chemometrics*, 34(4), 3202.
- [59] Amigo, J. M., del Olmo, A., Engelsen, M. M., Lundkvist, H., & Engelsen, S. B. (2019). Staling of white wheat bread crumb and effect of maltogenic α -amylases. Part 2: Monitoring the staling process by using near infrared spectroscopy and chemometrics. *Food Chem.*, 297, 124946.
- [60] Ozaki, Y., Huck, C., Tsuchikawa, S., & Engelsen, S.B. (2021). Near-infrared spectroscopy: theory, spectral analysis, instrumentation, and applications (1st ed.). Berlin-Heidelberg, Germany: Springer.
- [61] Raypah, M. E., Faris, A. N., Mohd Azlan, M., Yusof, N. Y., Suhailin, F. H., Shueb, R. H., & Mustafa, F. H. (2022). Near-Infrared Spectroscopy as a Potential COVID-19 Early Detection Method: A Review and Future Perspective. *Sensors*, 22(12), 4391.
- [61] Raypah, M. E., Omar, A. F., Muncan, J., Zulkurnain, M., & Abdul Najib, A. R. (2022). Identification of stingless bee honey adulteration using visible-near infrared spectroscopy combined with aquaphotomics. *Molecules*, 27(7), 2324.
- [63] Fagan, C. C., Everard, C., O'Donnell, C. P., Downey, G., Sheehan, E. M., Delahunty, C. M.,

O'Callaghan, D. J., & Howard, V. (2007). Prediction of processed cheese instrumental texture and meltability by mid-infrared spectroscopy coupled with chemometric tools. *Food Eng.*, 80(4), 1068-107.

[64] Chakravartula, S., Cevoli, Ch., Balestra, F., Fabbri, A., & Rosa, M. (2019). Evaluation of drying of edible coating on bread using NIR spectroscopy. *Food Eng.*, 240, 29-37.