



Research Paper

Evaluation of Infrared Roasting on Physicochemical and Sensory Properties of Wheat Saviq (*Triticum aestivum*) Using Fuzzy Logic Modeling

Vahid Najafi¹, Masoud Taghizadeh^{1*}

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Article History

Submitted: 2026/05/31

Revised: 2026/07/17

Accepted: 2026/08/07

Published
online: 2026/09/23

Keywords:

Infrared, Wheat Saviq,
Response surface
methodology
Fuzzy logic

*Corresponding author

email:

mtaghizadeh@um.ac.ir

ORCID: 
0000-0001-5960-8633



Abstract

Wheat Saviq, a traditional product prepared from roasted wheat grains, has considerable nutritional. This study investigated the effects of infrared roasting on the physicochemical and sensory properties of Wheat Saviq and optimized processing conditions using a Box–Behnken experimental design and Response Surface Methodology (RSM). Infrared power and roasting time were evaluated as independent variables, while moisture content, color parameters (L^* , a^* , b^* , and ΔE), water-holding capacity (WHC), and sensory attributes were measured as responses. Fuzzy logic was also applied to model the relationship between color, aroma, taste, texture, and overall acceptance. Increasing infrared power from 250 to 450 W reduced moisture content from 4.65% to 2.09%. Color parameters were significantly affected by power and roasting time, while WHC initially increased and then declined at higher treatment levels. Sensory analysis showed that intermediate roasting times and medium power levels produced the highest overall acceptance. The optimum conditions were predicted at 365.24 W for 18.28 min, yielding 3.39% moisture, $L^*=81.57$, $a^*=13.57$, $b^*=16.84$, $\Delta E=9.77$, WHC=204.69%, and an overall sensory score of 8.27. Fuzzy logic analysis identified taste and texture as the most influential factors affecting consumer acceptance, while desirable color and aroma could partly compensate for minor deficiencies in overall product texture. The predictive model showed strong agreement with experimental results. Overall, infrared roasting effectively improved quality, functionality, and sensory acceptance, indicating its potential for commercial production of Wheat Saviq.

How to cite this paper:

Najafi, V., and Taghizadeh, M. (2026). Evaluation of Infrared Roasting on Physicochemical and Sensory Properties of Wheat Saviq (*Triticum aestivum*) Using Fuzzy Logic Modeling. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 40: 95-112. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15069.775> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15069.775>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Wheat Saviq is a traditional roasted cereal product valued for its nutritional and functional properties. Conventional roasting techniques often cause uneven heat distribution and quality loss due to prolonged exposure. Developing efficient roasting technologies is essential to improve product quality and consumer acceptance. This study aimed to evaluate the effects of infrared roasting on the physicochemical and sensory characteristics of roasted Wheat Saviq (*Triticum aestivum* L.) and to optimize processing parameters using response surface methodology (RSM) and fuzzy logic modeling.

Material and Methods

A Box–Behnken experimental design was employed with three infrared power levels (250, 350, and 450 W) and three roasting times (10, 20, and 30 min). The responses analyzed included *moisture content*, *color parameters* (L^* , a^* , b^* , ΔE), *water-holding capacity* (WHC), and *sensory attributes* (color, aroma, taste, texture, and overall acceptance). Statistical analysis and process optimization were performed using RSM to determine the interactive effects of power and time. In addition, a Mamdani-type fuzzy inference system (FIS) was developed in MATLAB R2023b to predict overall sensory acceptance based on sensory input variables.

Results and Discussion

Increasing roasting power and time significantly reduced the final moisture content (from 4.65% to 2.09%) while enhancing color indices a^* and b^* due to

intensified Maillard and caramelization reactions. WHC initially increased under moderate conditions (up to 206%) but decreased at higher energy inputs due to protein denaturation and collapse of hydrophilic structures. Sensory evaluation by trained panelists indicated the highest overall acceptance at intermediate roasting levels, while excessive roasting negatively affected flavor and appearance. Optimization results revealed that the best roasting conditions were 365.24 W and 18.28 min, achieving desirable moisture (3.39%), L^* (81.57), a^* (13.57), b^* (16.84), WHC (204.69%), and overall sensory score (8.27). The fuzzy logic model demonstrated high predictive accuracy, identifying taste and texture as the most influential factors in consumer acceptance.

Conclusions

Infrared roasting proved to be a rapid, uniform process capable of improving the physicochemical quality and sensory appeal of wheat *Saviq*. Combining infrared technology with fuzzy modeling provides a reliable tool for predicting sensory outcomes and optimizing roasting parameters. These findings suggest the potential industrial application of infrared roasting for producing high-quality roasted Wheat Saviq.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Research and Technology Deputy of Ferdowsi University of Mashhad

Author Contributions

First Author: Investigation, Methodology, Conceptualization, Formal analysis, Writing-Original Draft.

Second Author: Conceptualization, Data

curation, Project administration, Supervision, Formal analysis, Validation. Writing-Review & Editing.

Data Availability Statement

Data will be made available upon request.

Ethical Considerations

This article has been prepared in accordance with research ethics principles, and all standards related to academic integrity, originality of content, and proper citation have been observed.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Funding Statement

This research received no specific grant or financial support from any governmental, private, or non-profit organization.



ارزیابی روش برشته کردن مادون قرمز بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی سویق گندم (*Triticum aestivum*) با استفاده از مدل‌سازی منطق مرحله‌ای

وحید نجفی^۱ و مسعود تقی‌زاده^{۱*}

^۱. گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده	تاریخچه مقاله
سویق گندم، فرآورده‌ای سنتی حاصل از برشته کردن دانه‌های گندم، دارای ارزش تغذیه‌ای قابل توجهی است. در این پژوهش، اثر برشته کردن مادون قرمز بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حسی سویق گندم بررسی و شرایط فرایند بهینه‌سازی شد. بدین منظور، از طرح باکس بنکن و روش سطح پاسخ (RSM) برای ارزیابی اثر توان و زمان برشته کردن استفاده شد. پاسخ‌ها شامل رطوبت، شاخص‌های رنگ (L^* , a^* , b^* , ΔE) و ظرفیت نگهداری آب (WHC) و ارزیابی حسی بودند. نتایج نشان داد با افزایش توان از ۲۵۰ به ۴۵۰ وات، رطوبت از ۴/۶۵٪ به ۲/۰۹٪ کاهش یافت. با افزایش توان و زمان اعمال مادون قرمز، مقادیر a^* و b^* افزایش یافتند و شاخص‌های L^* و ΔE نیز تحت تأثیر شرایط فرایند قرار گرفتند، WHC در ابتدا با افزایش توان و زمان بهبود یافت و در مقادیر بالاتر کاهش یافت. ارزیابی حسی نشان داد که توان‌های متوسط و زمان‌های میانی، پذیرش کلی مطلوب‌تری ایجاد کردند. شرایط بهینه فرایند، توان ۳۶۵/۲۴ وات و زمان ۲۸/۱۸ دقیقه تعیین شد در این شرایط رطوبت نهایی ۳/۳۹٪، L^* برابر ۸۱/۵۷، a^* برابر ۱۳/۵۷، b^* برابر ۱۶/۸۴، ΔE برابر ۹/۷۷، WHC برابر ۲۰۴/۶۹٪ و امتیاز حسی ۸/۲۷ حاصل گردید. تحلیل منطق فازی، طعم و بافت را مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پذیرش مصرف‌کننده معرفی کرد و مدل پیش‌بینی با نتایج تجربی سازگاری بالایی داشت. در مجموع، برشته کردن مادون قرمز روشی مؤثر برای بهبود کیفیت، ویژگی‌های عملکردی و پذیرش سویق گندم و توسعه تولید تجاری آن محسوب می‌شود.	دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ واژه‌های کلیدی: مادون قرمز، سویق گندم، منحنی سطح پاسخ، منطق مرحله‌ای. *پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mtaghizadeh@um.ac.ir ORCID:  ۰۰۰۰-۰۰۰۰-۵۹۶۰-۸۶۳۳ 

نحوه استناد به این مقاله:

نجفی، و. و تقی‌زاده، م. (۱۴۰۵). ارزیابی روش برشته کردن مادون قرمز بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی سویق گندم (*Triticum aestivum*) با استفاده از مدل‌سازی منطق مرحله‌ای. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۴۰: ۹۵-۱۱۲.
<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15069.775>

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از پرمصرف‌ترین غلات جهان است که به دلیل ویژگی‌های عملکردی و کاربردی غذایی موردتوجه قرار گرفته است (Harisha *et al.*, 2025; Khalid *et al.*, 2023; Sztupecki *et al.*, 2023). یکی از فرآورده‌های سنتی آن، سوپ گندم برشته است که در خاورمیانه و آسیای جنوبی از جایگاه خاصی برخوردار است. سوپ گندم به دلیل هضم آسان و اثرات بالقوه سلامت‌بخش، نزد مصرف‌کنندگان محبوبیت یافته است (Pande *et al.*, 2017).

فراوری مواد غذایی یک نیاز اساسی برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی است، اما اغلب شامل عملیات حرارتی است که می‌تواند کیفیت ارگانولپتیک (Organoleptic) را به خطر بیندازد و در عین حال ایمنی مواد غذایی را بهبود بخشد (Anumudu *et al.*, 2024). برشته کردن به‌عنوان فرایندهای حرارتی از جمله ابزارهای مهم در اصلاح ویژگی‌های تغذیه‌ای، بافت و حس محصولات غذایی مبتنی بر غلات به شمار می‌روند؛ برشته کردن در صنایع غذایی عمدتاً باهدف بهبود ویژگی‌های حسی از جمله طعم، عطر، رنگ و بافت انجام می‌شود. افزون بر این، این فرایند به کاهش رطوبت، غیرفعال‌سازی آنزیم‌های تخریب‌کننده مواد مغذی که در نهایت ایمنی و کیفیت محصول را ارتقا می‌بخشد (King *et al.*, 2024; Narra *et al.*, 2024). این فرایند نه تنها باعث ایجاد ویژگی‌های حسی مطلوب می‌شود، بلکه می‌تواند میزان آنتی‌اکسیدان‌های محصول را افزایش دهد و کیفیت کلی آن را بهبود بخشد (Asiedu *et al.*, 2025).

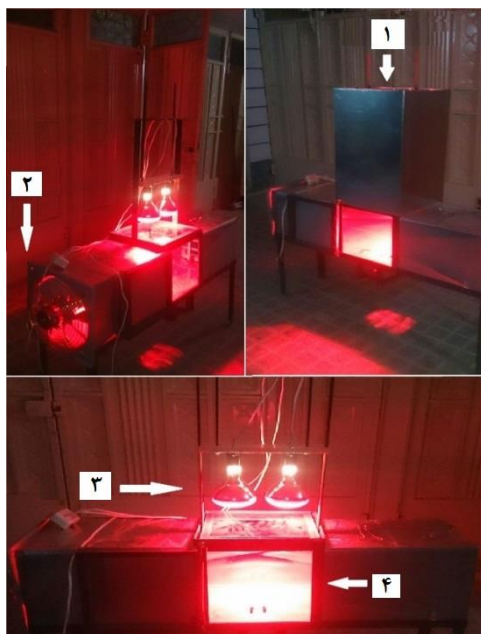
هم زمان با فرایند برشته کردن، نشاسته ژلاتینه شده و حجم ماده غذایی افزایش می‌یابد که باعث شکل‌گیری بافت پف‌دار و ظاهری جذاب می‌شود. این فرایند همچنین به کاهش بار میکروبی کمک کرده و ایمنی محصول را ارتقا می‌دهد. بااین‌وجود، ویژگی‌ها و ترکیب تغذیه‌ای نهایی محصول به نوع ماده اولیه و شرایط فراوری وابستگی زیادی دارد (Oracz *et al.*, 2023). در روش‌های سنتی، فراوری معمولاً از طریق حرارت مستقیم یا هوای داغ انجام می‌شود، اما این روش‌ها اغلب با توزیع غیر یکنواخت حرارت، زمان طولانی و کاهش ترکیبات حساس به حرارت همراه هستند (Chobot *et al.*, 2024; Sruthi *et al.*, 2021). برشته کردن با استفاده از امواج مادون قرمز (Infrared) به‌عنوان یک فناوری نوین، در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای در صنایع غذایی به‌ویژه در فراوری دانه‌ها و

غلات به خود جلب کرده است. مادون‌قرمز بخشی از طیف الکترومغناطیسی است که بین ناحیه مایکروویو (Microwave) و نور مرئی قرار دارد و دارای بسامدهایی در محدوده ۳۰ تا ۴۳۰ تراهرتز است. این روش به دلیل مزایایی نظیر کاهش مصرف انرژی، راندمان حرارتی بالا، طراحی فشرده تجهیزات و ضریب تابش مؤثر، جایگزینی کارآمد برای شیوه‌های سنتی برشته کردن محسوب می‌شود (Bagheri, 2020). پیشرفت‌های اخیر در طراحی و ساخت تابش‌گرهای مادون‌قرمز، زمینه را برای استفاده گسترده‌تر از این فناوری فراهم ساخته است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که اثربخشی این سامانه‌ها بین ۸۰ تا ۹۰ درصد بوده و به دلیل تمرکز تابش در یک بازه طول موج باریک، امکان بهبود کیفیت محصول و کوتاه‌تر شدن زمان فرایند را فراهم می‌سازد (Anumudu *et al.*, 2024; Bagheri, 2020).

بسیاری از مطالعات، تعامل پیچیده بین زمان، دما و انرژی در فرایندهای حرارتی را نادیده گرفته و همچنان به ارزیابی حسی ذهنی انسان تکیه دارند که باعث ناهماهنگی و کاهش تکرارپذیری نتایج می‌شود (Aung *et al.*, 2022). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، بهینه‌سازی فرایندهای حرارتی در تولید فرآورده‌های مبتنی بر غلات و نقش تعیین‌کننده شرایط برشته کردن بر کیفیت نهایی محصول، بررسی اثر عامل‌های فرایندی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی سوپ گندم ضروری به نظر می‌رسد. از این رو، هدف اصلی این پژوهش بهینه‌سازی فرایند برشته کردن مادون‌قرمز دانه‌های گندم از طریق بررسی هم‌زمان اثر توان و زمان اعمال مادون‌قرمز بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل رطوبت نهایی، شاخص‌های رنگی و ظرفیت نگهداری آب، به همراه ارزیابی ویژگی‌های حسی محصول بود.

در این راستا، از روش سطح پاسخ سوپ گندم به‌منظور تعیین شرایط بهینه فرایند باهدف دستیابی به کیفیت مطلوب و پذیرش مصرف‌کننده استفاده شد. علاوه بر این، منطق مرحله‌ای به‌عنوان یک ابزار تحلیلی تکمیلی برای تفسیر داده‌های حسی و پیش‌بینی پذیرش کلی محصول بر اساس مجموعه‌ای از ویژگی‌های حسی به کار گرفته شد. باوجود مطالعات متعدد درباره کاربرد تابش مادون‌قرمز در خشک‌کردن و برشته‌کردن غلات، تا آنجا که نویسندگان بررسی کرده‌اند، گزارشی درباره بهینه‌سازی هم‌زمان توان و زمان برشته‌کردن مادون‌قرمز سوپ گندم و مدل‌سازی پذیرش حسی آن با تلفیق روش سطح پاسخ و منطق مرحله‌ای وجود

آزمایش‌ها با اعمال ولتاژهای متفاوت توسط دستگاه، جهت ایجاد توان‌های موردنیاز انجام شدند. فاصله میان منبع پرتودهی مادون قرمز و نمونه ۲۰ سانتی‌متر تنظیم شد. قبل از شروع هر آزمایش منبع پرتودهی مادون قرمز به مدت ۱۰ دقیقه با ولتاژ معین درون محفظه روشن شد تا پرتودهی به دمای ثابت رسیده و شرایط درون محفظه کاملاً یکنواخت شود. سپس نمونه‌های آماده شده دانه گندم پوست‌کنده درون دستگاه جهت اعمال تیمارها قرار داده شدند. تیمارها شامل توان مادون قرمز (بازه ۲۵۰ تا ۴۵۰ وات) و زمان (بازه ۱۰ تا ۳۰ دقیقه) با تکرار نقطه مرکزی (جدول ۲)، و پاسخ‌های شامل رطوبت، شاخص‌های رنگ (L^* , a^* , b^* , ΔE) و ظرفیت نگهداری آب (WHC) و ارزیابی حسی نمونه بودند. پس از قرارگیری نمونه در محفظه، عمل هم زدن نمونه‌ها در میانه کار به صورت دستی و سریع انجام شد. این عمل جهت یکنواخت برشته شدن نمونه‌ها صورت گرفت (Bagheri *et al.*, 2019). پس از برشته کردن، نمونه‌ها با آسیاب خانگی (Black & Decker 600 W)، آسیاب و از الک استیل با مش ۱۲۵ میکرومتر عبور داده شدند. پودر حاصل در کیسه‌های پلی‌اتیلن با چگالی کم بسته‌بندی و تا زمان آزمون‌های فیزیکوشیمیایی و حسی در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد.



شکل ۱- سامانه برشته‌کن مادون قرمز؛ (۱) محفظه مادون قرمز؛ (۲) فن تهویه؛ (۳) مادون قرمز؛ (۴) محل قرارگیری نمونه.

ندارد. از این رو، نوآوری پژوهش حاضر در به کارگیری هم‌زمان روش سطح پاسخ برای تعیین شرایط بهینه فرایند و سامانه استنتاج مرحله‌ای برای مدل‌سازی ارتباط ویژگی‌های رنگ، عطر، طعم و بافت با پذیرش کلی حسی سوپ گندم است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه

دانه‌های گندم پوست‌کنده از یک تأمین‌کننده محلی در تهران تهیه شد. ناخالصی‌ها، دانه‌های شکسته و دانه‌های تغییر رنگ داده به صورت دستی جداسازی گردید. ترکیبات دانه‌ها شامل رطوبت، چربی، پروتئین و خاکستر مطابق روش‌های استاندارد ملی اندازه‌گیری شد (جدول ۱). برای پیش تیمار، یک کیلوگرم دانه گندم تمیز شده در ۵ لیتر محلول سدیم کلرید (NaCl) ۲ درصد وزنی - حجمی به مدت ۵ ساعت در همزن مکانیکی ملایم خیسانده شد. این مرحله موجب افزایش هیدراتاسیون (Hydration) و تسهیل انتقال حرارت یکنواخت طی فرایند برشته کردن گردید. پس از خیساندن، نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و روی پارچه‌های نخی پهن شدند تا رطوبت سطحی آن‌ها به کمتر از ۱۲٪ کاهش یابد. نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی و تا زمان پردازش در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پیش از برشته کردن، نمونه‌ها حداقل یک ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا تعادل حرارتی برقرار گردد.

جدول ۱- ترکیبات تشکیل‌دهنده دانه گندم پوست‌کنده

ترکیبات	روش آزمون / شماره استاندارد	مقدار (%)
رطوبت	روش وزنی / ۲۷۰۵	۸/۶۹
چربی	استخراج سوکسله / ۷۶۶	۰/۳۴
پروتئین	روش کج‌دال / ۱۰۵	۱۱/۸۵
خاکستر	روش کوره الکتریکی / ۱۰۳	۰/۷۱

برشته کردن با مادون قرمز

تصویر برشته‌کن مادون قرمز مورد استفاده در این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. لامپ‌های مادون قرمز الکتریکی (پرتودهی مادون قرمز با توان ۱۵۰۰ وات) در بخش بالایی اتاقک درون محفظه مادون قرمز نصب شد.

ارزیابی حسی و مدل سازی مرحله ای ارزیابی حسی

به منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل بر کیفیت حسی و تعیین شرایط بهینه، ده ارزیاب آموزش دیده پنج ویژگی اصلی شامل رنگ، عطر، طعم، بافت و پذیرش کلی را ارزیابی کردند. امتیازدهی هر ویژگی در مقیاس ۱ تا ۱۰ (خیلی خوب (۹) و ۱۰)، خوب (۷ و ۸)، متوسط (۵ و ۶)، بد (۳ و ۴)، خیلی بد (۱ و ۲)) انجام گرفت (جدول ۳). همچنین جهت انجام وزن دهی به هر یک از خصوصیات حسی، از ارزیاب ها درخواست شد که اولویت شخصی خود را در رابطه با اهمیت هر یک از خصوصیات حسی با نمره دهی درصدی به صورت بی اهمیت (۰ تا ۲۰) تا حدی مهم (۲۰ تا ۴۰)، مهم (۴۰ تا ۶۰)، خیلی مهم (۶۰ تا ۸۰)، به شدت مهم (۸۰ تا ۱۰۰) مشخص نمایند. در نهایت، یک امتیاز نهایی حسی برای هر نمونه محاسبه شد و این امتیاز به عنوان متغیر پاسخ در بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفت. این امتیاز بیانگر قضاوت کلی ارزیاب ها نسبت به محصول و تنها پاسخ حسی وارد فرایند بهینه سازی شد.

برای پیش بینی پذیرش کلی سوپ گندم بر اساس داده های ارزیابی حسی، از سامانه منطق مرحله ای نوع Mamdani استفاده شد. مدل در محیط MATLAB R2023b طراحی گردید. ویژگی های رنگ، عطر، طعم و بافت به عنوان ورودی و پذیرش کلی به عنوان خروجی تعریف شدند. برای هر متغیر، پنج سطح زبانی (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) با توابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شد. استنتاج مرحله ای با ۲۰ قانون اگر-آنگاه و غیر مرحله ای سازی با روش مرکز ثقل (Centroid) انجام شد (Ahmad et al., 2015). تجزیه و تحلیل شباهت در مقیاس لفظی میان خصوصیات حسی از نظر اهمیت در ارزیاب ها با ساخت ماتریس مجاورت و مقایسه توسط ثابت همبستگی پیرسون با در نظر گرفتن آستانه عدم تشابه برابر با ۰/۹۵ در نرم افزار XLSTAT انجام شد.

همچنین روی ماتریس شباهت تشکیل شده، تحلیل مقیاس گذاری چندبعدی انجام گردید. رتبه دهی میان خصوصیات حسی به صورت جفت شده بر اساس کمترین عدم شباهت، اختلاف و فاصله در مختصات دوبعدی انجام گرفت و نقشه پیکربندی رسم گردید. در نهایت، نحوه تغییرات عدم شباهت در برابر نسبت فاصله به اختلاف به شکل دیاگرام شپرد (Shepard diagram) مشخص شد.

$$WHC = \frac{W_2 - W_1}{W_0} \quad (3)$$

جدول ۲- سطوح متغیرهای مستقل برای طراحی آزمایش ها

دامنه ی سطوح			
متغیر مستقل	۱	۰	-۱
توان مادون قرمز (وات)	۴۵۰	۳۵۰	۲۵۰
زمان اعمال مادون قرمز (دقیقه)	۳۰	۲۰	۱۰

اندازه گیری رطوبت

میزان رطوبت نمونه ها به روش وزنی و از طریق خشک کردن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت تعیین گردید. رطوبت بر مبنای تر (wb%) بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید (Ahn et al., 2014).

$$MC(wb\%) = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه، M_0 : وزن اولیه گندم (گرم)، M : وزن نهایی (گرم) و MC : میزان رطوبت بر اساس وزن مرطوب است.

آنالیز رنگ

عامل های رنگی (L^* , a^* , b^*) با استفاده از رنگ سنج (Hunter Lab D25)، تحت منبع نور D65 و زاویه مشاهده ۱۰ درجه ثبت شدند. تغییر کلی رنگ (ΔE) بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید (Ahmad et al., 2015).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

که در این رابطه، ΔL^* : تغییر روشنایی، Δa^* : تغییر مختصات قرمز/سبز و Δb^* : تغییر مختصات زرد/آبی را نشان می دهد.

ظرفیت نگهداری آب (WHC)

برای تعیین WHC، یک گرم نمونه در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر پراکنده شد. سپس نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند، ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتند و در نهایت به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند WHC بر اساس رابطه ۳ محاسبه گردید (Berton et al., 2002).

که در این رابطه، W_0 : وزن پودر خشک (گرم)، W_1 : وزن فالکون به همراه پودر خشک (گرم) و W_2 : وزن ویال به همراه رسوب پودر حاوی آب (گرم) است.

آن توان مادون قرمز (A) است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، افزایش توان و زمان مادون قرمز باعث کاهش قابل توجه رطوبت نهایی شد. با توجه به شیب نمودار و ضرایب رابطه کدبندی شده، زمان تأثیر بیشتری نسبت به توان مادون قرمز دارد.

$$W = +13.20417 - 0.017383 \times A - 0.31821 \times B + 2.52500E_004 \times A \times B + 2.01667E_003 \times B^2 \quad (4)$$

$$W = +3.33 - 1.23 \times A - 1.49 \times B + 0.25 \times A \times B + 0.20 \times B^2 \quad (5)$$

جدول ۴- تجزیه و تحلیل واریانس روش برشته کردن مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی سوئیک گندم

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ضریب معنی داری p
مدل	۴	۲۲/۸۴	۵/۷۱	<۰/۰۰۰۱
توان مادون قرمز (A)	۱	۹/۱۳	۹/۱۳	<۰/۰۰۰۱
زمان اعمال مادون قرمز (B)	۱	۱۳/۳۵	۱۳/۳۵	<۰/۰۰۰۱
اثر متقابل A × B	۱	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۰۰۳۹
زمان (B) ^۲	۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۲۴۲
باقی مانده	۶	۰/۰۷۴	۰/۰۱۲	—
عدم برازش	۴	۰/۰۶۸	۰/۰۱۷	۱/۱۷۱۷ ^{ns}
خطای خالص	۲	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۳	—
مجموع کل	۱۰	۲۲/۹۲	—	—

ns: غیرمعنی دار (p < 0.05)

همان‌طور که در (شکل ۲)، نشان داد شده، با افزایش توان مادون قرمز از ۲۵۰ به ۳۵۰ وات، رطوبت نهایی از ۴/۶۵٪ به ۳/۴۰٪ کاهش یافت. افزایش بیشتر توان تا ۴۵۰ وات رطوبت نهایی را به ۲/۰۹٪ رساند. برای زمان اعمال مادون قرمز، افزایش از ۱۰ به ۲۰ دقیقه رطوبت را از ۵/۰۲٪ به ۳/۳۰٪ کاهش داد و افزایش زمان تا ۳۰ دقیقه رطوبت نهایی را به ۲/۰۴٪ کاهش داد. روش برشته کردن مادون قرمز یکنواختی در کاهش رطوبت ایجاد می‌کند، زیرا انرژی به طور مستقیم به مولکول‌های آب منتقل شده و حرارت حجمی تولید می‌شود. اگرچه در نمودار سه بعدی (شکل ۲) اثر توان و زمان اعمال مادون قرمز در نگاه اول تا حدی خطی به نظر می‌رسد، نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۴) و معادله رگرسیونی (روابط

جدول ۳- معیارهای مطلوب برای ارزیابی حسی سوئیک برشته شده گندم

ویژگی حسی	ویژگی مطلوب
رنگ	طبیعی، یکنواخت، بدون لکه‌های قهوه‌ای یا سوخته
عطر	عطر طبیعی گندم، بوی برشته شده
طعم	طعم برشته طبیعی، بدون مزه‌های نامطلوب
بافت	یکنواخت، بدون توده، بافت مطلوب و غیر سخت
پذیرش کلی	جذابیت نهایی بر اساس همه ویژگی‌ها

تصویربرداری ریزبین الکترونی روبشی (SEM) ساختار سطحی و مورفولوژی نمونه سوئیک گندم در نقطه بهینه شده با استفاده از ریزبین الکترون روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

بهینه‌سازی و تحلیل آماری

به منظور طراحی آزمایش و بررسی اثر برشته کردن مادون قرمز و بهینه‌سازی فرایند برشته کردن، از طرح آزمایشی باکس-بنکن و روش سطح پاسخ سوئیک گندم (RSM)، نرم افزار دیزاین اکسپرت (Design Expert v11.1.1.0) استفاده گردید. ارزیابی معنی داری اثرات اصلی، اثرات متقابل با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح احتمال $p < 0.05$ صورت گرفت. معیارهای آماری شامل مقدار p-value، ضریب تعیین (R^2) و عدم برازش (Lack of fit) برای ارزیابی کفایت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج و بحث

اثر برشته کردن مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی سوئیک گندم

نتایج تحلیل واریانس اثر برشته کردن مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی نشان داد که بین متغیرهای مستقل، توان مادون قرمز (A)، زمان اعمال مادون قرمز (B)، اثر متقابل آن‌ها ($A \times B$) و توان دوم زمان (B^2) در سطح احتمال ۱۰٪ تفاوت معنی داری وجود داشت (جدول ۴). بر طبق این جدول ضریب معنی داری (P-Value) کمتر از ۰/۱ نشان دهنده‌ی معنی دار بودن مدل است، همچنین غیرمعنی دار شدن عدم برازش (Lack of fit) نشان دهنده‌ی دقت کافی مدل است.

بر اساس طراحی و تحلیل رگرسیون، رابطه واقعی داده‌ها به صورت (رابطه ۴) و کدبندی شده (رابطه ۵) به دست آمد. با توجه به رابطه کدبندی شده بیشترین تأثیر در کاهش میزان رطوبت نهایی مربوط به زمان اعمال مادون قرمز (B) و پس از

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل کلی برای تمامی شاخص‌های رنگی در سطح احتمال $p < 0.05$ معنی‌دار بوده و با توجه به غیرمعنی‌دار بودن عدم برازش، از کفایت آماری مناسبی برخوردار است. برای L^* ، اثر اصلی توان و زمان، اثر متقابل و توان دوم هر دو متغیر (B^2 و A^2) معنی‌دار بودند که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و غیرخطی این فاکتورها بر L^* نمونه است. در a^* ، اثر توان، زمان و تعامل آن‌ها ($A \times B$) معنی‌دار بود، اما توان دوم متغیرها (B^2 و A^2) معنی‌دار نبود که بیانگر نقش بیشتر تغییرات خطی و متقابل در تغییرات a^* است. در b^* ، اثر اصلی توان و زمان معنی‌دار بودند، درحالی‌که اثر متقابل ($A \times B$) و توان دوم توان (B^2 و A^2) اثر معنی‌داری نداشتند، بنابراین تغییرات b^* عمدتاً تحت تأثیر اثرات خطی متغیرهای فرایندی قرار دارد. در نهایت، برای شاخص ΔE ، اثرات اصلی توان و زمان، اثر متقابل آن‌ها و توان دوم توان در سطح احتمال $p < 0.05$ معنی‌دار بودند، اما درجه دوم زمان (B^2) معنی‌دار نبود.

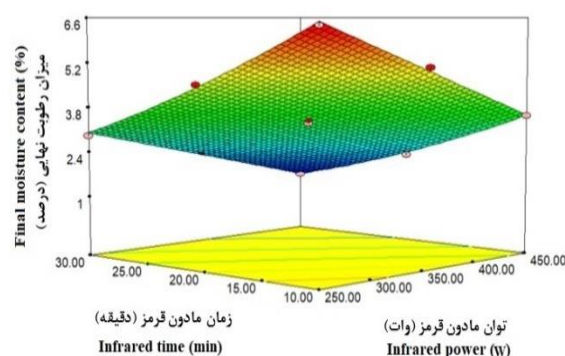
جدول ۵- تجزیه و تحلیل واریانس روش برشته کردن مادون قرمز بر شاخص‌های رنگی سوپق گندم

شاخص رنگی	رابطه کدبندی شده و رابطه واقعی
L^*	رابطه کدبندی شده
	$L^* = +81.33 - 4.75 \times A - 5.68 \times B - 2.38 \times A \times B - 1.69 \times A^2 - 0.97 \times B^2$
	رابطه واقعی
a^*	رابطه کدبندی شده
	$L^* = +68.05178 + 0.11859 \times A + 0.65237 \times B - 2.38000E_003 \times A \times B - 1.69342E_004 \times A^2 - 9.68421E_004 \times B^2$
	رابطه واقعی
b^*	رابطه کدبندی شده
	$a^* = +17.02 + 1.99 \times A + 2.70 \times B + 0.48 \times A \times B$
	رابطه واقعی
ΔE	رابطه کدبندی شده
	$a^* = +8.01318 + 0.010300 \times A + 0.10200 \times B + 4.80000E_004 \times A \times B$
	رابطه واقعی
	رابطه کدبندی شده
	$b^* = +13.73 + 1.53 \times A + 2.25 \times B - 0.22 \times B^2$
	رابطه واقعی
	رابطه کدبندی شده
	$b^* = +3.01817 + 0.015283 \times A + 0.31163 \times B - 2.17000E_003 \times B^2$
	رابطه واقعی
	رابطه کدبندی شده
	$\Delta E = +10.11 + 5.04 \times A + 6.35 \times B + 2.18 \times A \times B + 1.17 \times A^2 + 0.69 \times B^2$
	رابطه واقعی
	رابطه کدبندی شده
	$\Delta E = +12.15936 - 0.075329 \times A - 0.40401 \times B + 2.18104E_003 \times A \times B + 1.17300E_004 \times A^2 + 6.89412E_003 \times B^2$
	رابطه واقعی

ns: غیرمعنی‌دار ($p < 0.05$)

۴ و ۵) نشان می‌دهد که جمله درجه دوم زمان (B^2) اثر معنی‌داری بر پاسخ دارد. این موضوع بیانگر وجود رفتار غیرخطی ملایم در محدوده طراحی آزمایش است که ممکن است در نمایش گرافیکی سه‌بعدی به طور کامل قابل تشخیص نباشد.

همچنین غیرمعنی‌دار بودن عدم برازش (Lack of fit) کفایت مدل درجه دو را در توصیف رفتار پاسخ تأیید می‌کند. با افزایش توان، مولکول‌های آب انرژی بیشتری جذب کرده و تبخیر سریع‌تر انجام می‌شود (Joudi-Sarighayeh et al., 2023). آنومودو و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که مادون قرمز یک فناوری حرارتی نوین با سرعت فراوری بالا، کار آیی انرژی بهتر و حفظ مطلوب کیفیت حسی و غذایی در مقایسه با روش‌های حرارتی مرسوم است. با این حال، نفوذ حرارتی محدود و ضرورت طراحی دقیق شرایط تابش و بهینه‌سازی توان، فاصله و زمان تابش برای دستیابی به کیفیت مطلوب، الزامی است (Anumudu et al., 2024). کاهش رطوبت نهایی سوپق گندم با افزایش توان و زمان اعمال مادون قرمز با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده درباره فراوری حرارتی غلات و شبه‌غلات همخوانی دارد. موکونزی و آری (۲۰۲۵) گزارش کردند که برشته کردن خشک آرد کینوا موجب کاهش ۸/۳۷ درصدی رطوبت آن شد که این کاهش را به خروج آب آزاد و بخشی از آب پیوندی در اثر دریافت انرژی حرارتی نسبت دادند (Mukunzi & Aryee, 2025).



شکل ۲- نمودار سه‌بعدی اثر زمان و توان اعمال مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی سوپق گندم

اثر برشته کردن به روش مادون قرمز بر شاخص‌های رنگی سوپق گندم

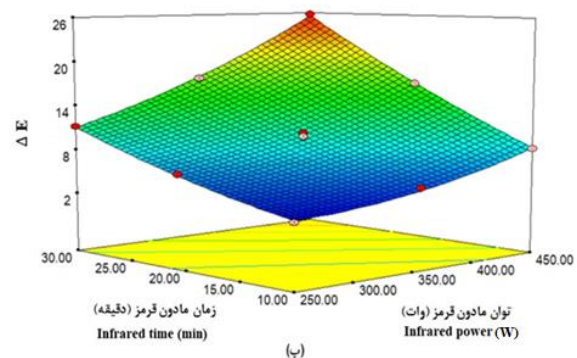
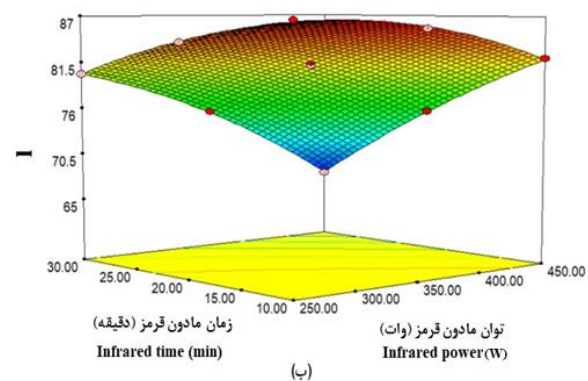
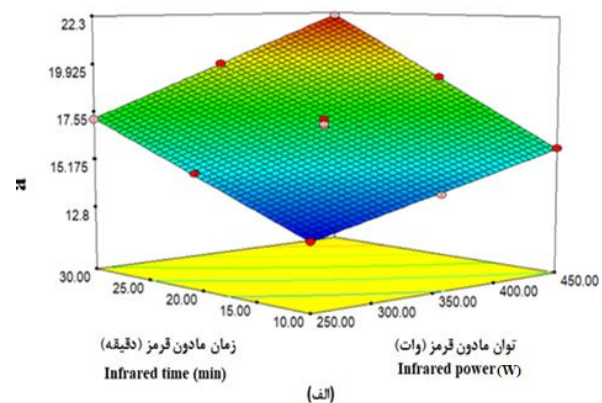
نتایج تحلیل واریانس اثر توان و زمان اعمال مادون قرمز بر شاخص‌های رنگی b^* ، a^* ، L^* و ΔE در جدول ۵ ارائه شده

درجه دوم توان قرار گرفت، درحالی‌که جمله درجه دوم زمان معنی‌دار نبود. بیشترین افزایش ΔE نیز به زمان اعمال مادون‌قرمز مربوط بود که با شدت واکنش‌های میلارد، کاراملیزاسیون و پلیمریزاسیون ترکیبات قندی و پروتئینی مرتبط بوده و شدت رنگ نهایی محصول را افزایش می‌دهد (El Hosry *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2023; Selvi *et al.*, 2020) (شکل ۳).

جدول ۶- روابط رگرسیونی واقعی و کدبندی شده شاخص‌های رنگی سوپق گندم

شاخص رنگی	رابطه کدبندی‌شده و رابطه واقعی
L^*	رابطه کدبندی شده: $L^* = +81.33 - 4.75 \times A - 5.68 \times B - 2.38 \times A \times B - 1.69 \times A^2 - 0.97 \times B^2$ رابطه واقعی: $L^* = +68.05178 + 0.11859 \times A + 0.65237 \times B - 2.38000E_003 \times A \times B - 1.69342E_004 \times A^2 - 9.68421E_004 \times B^2$
a^*	رابطه کدبندی شده: $a^* = +17.02 + 1.99 \times A + 2.70 \times B + 0.48 \times A \times B$ رابطه واقعی: $a^* = +8.01318 + 0.010300 \times A + 0.10200 \times B + 4.80000E_004 \times A \times B$
b^*	رابطه کدبندی شده: $b^* = +13.73 + 1.53 \times A + 2.25 \times B - 0.22 \times B^2$ رابطه واقعی: $b^* = +3.01817 + 0.015283 \times A + 0.31163 \times B - 2.17000E_003 \times B^2$
ΔE	رابطه کدبندی شده: $\Delta E = +10.11 + 5.04 \times A + 6.35 \times B + 2.18 \times A \times B + 1.17 \times A^2 + 0.69 \times B^2$ رابطه واقعی: $\Delta E = +12.15936 - 0.075329 \times A - 0.40401 \times B + 2.18104E_003 \times A \times B + 1.17300E_004 \times A^2 + 6.89412E_003 \times B^2$

A: توان مادون‌قرمز (وات); B: زمان اعمال مادون‌قرمز (دقیقه)



شکل ۳- نمودار سه‌بعدی اثر زمان اعمال مادون‌قرمز و توان مادون‌قرمز بر شاخص‌های رنگی (الف: a^* ; ب: L^* ; پ: ΔE) سوپق گندم

به‌طورکلی، بیشترین اثرگذاری بر تغییرات رنگی به ترتیب مربوط به زمان اعمال مادون‌قرمز، توان مادون‌قرمز و اثرات متقابل و غیرخطی آن‌ها بود. اخلاص و همکاران (Ekhlash *et al.*, 2024). اثر خشک‌سازی مادون‌قرمز بر پودر گندم جوانه‌زده بررسی کردند. نتایج نشان داد روش مادون‌قرمز سبب بهبود ویژگی‌های رنگی (افزایش مؤلفه‌های a^* و b^*)، حفظ بیشتر رطوبت و افزایش معنی‌دار محتوای فنول‌های کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در مقایسه با خشک‌سازی هوای گرم شد. همچنین، کاهش بار میکروبی در تیمار مادون‌قرمز

روابط رگرسیونی اثر توان و زمان اعمال مادون‌قرمز بر شاخص‌های رنگی L^* , a^* , b^* و ΔE در جدول ۶ نشان‌داده شده است. بیشترین افزایش a^* نیز مربوط به زمان بود؛ افزایش زمان از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه حدود ۳۵٪ افزایش a^* را به همراه داشت. برای شاخص b^* ، توان، زمان و توان دوم زمان معنی‌دار بودند و بیشترین اثر مربوط به زمان اعمال مادون‌قرمز بود؛ افزایش زمان از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه حدود ۳۹٪ و افزایش توان از ۲۵۰ تا ۴۵۰ وات حدود ۱۲٪ افزایش b^* را نشان داد. شاخص ΔE تحت تأثیر معنی‌دار توان، زمان، اثر متقابل توان و زمان و جمله

تغییرات زمان و توان مادون قرمز است رابطه واقعی و کدبندی شده (رابطه ۶ و ۷) نشان می‌دهد که متغیر مستقل زمان اعمال مادون قرمز اثرگذاری بیشتری نیز در کاهش ظرفیت نگهداری آب دارد. نمودار سه‌بعدی نشان داد (شکل ۴) که افزایش توان از ۲۵۰ به ۳۵۰ وات موجب افزایش WHC از ۱۹۷٪ به ۲۰۶٪ شد، اما با افزایش توان تا ۴۵۰ وات، WHC به ۱۸۲٪ کاهش یافت.

به همین ترتیب، افزایش زمان از ۱۰ به ۲۰ دقیقه باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب از ۱۹۸٪ به ۲۰۵٪ شد، اما افزایش بیشتر زمان تا ۳۰ دقیقه آن را به ۱۷۶٪ کاهش داد. این رفتار عمدتاً ناشی از حضور گروه‌های آب دوست در پروتئین‌ها، فیبرها و کربوهیدرات‌هاست؛ افزایش اولیه توان باعث افزایش قدرت جذب آب می‌شود، اما با دنا توره شدن (Denaturation) پروتئین‌ها، نمایان شدن گروه‌های آب‌گریز و مشارکت پروتئین‌ها در واکنش میلارد، ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد (He et al., 2025). مرشدی و همکاران (۱۳۹۷)، در بهینه‌سازی فرایند برشته کردن چهار رقم تجاری مغز پسته را با روش مادون قرمز گزارش کردند که روش برشته کردن با مادون قرمز انتظارات کلی فرایند را به لحاظ کیفی و حسی برآورده می‌کند و زمان فرایند را به میزان چشمگیری کوتاه می‌کند (Morshedi et al., 2018). افزایش اولیه ظرفیت نگهداری آب با نتایج باتاریوک و همکاران (۲۰۲۳) درباره آرد سورگوم حرارت‌دیده همسو بود و می‌تواند به افزایش تخلخل و آشکار شدن گروه‌های آب‌دوست مربوط باشد. کاهش آن در توان و زمان‌های بالاتر نیز احتمالاً ناشی از دنا توراسیون پروتئین‌ها و تخریب ساختارهای جاذب آب است (Batariuc et al., 2023).

مشاهده گردید. پژوهشگران نتیجه گرفتند که تابش مادون-قرمز قادر است کیفیت ظاهری و ارزش تغذیه‌ای غلات را ارتقا دهد؛ هرچند اعمال زمان و توان بالا موجب افزایش بیش از حد قهوه‌ای شدن و افت پذیرش مصرف‌کننده می‌شود (Ekhlas et al., 2024). افزایش a^* و b^* با نتایج اخلاص و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت داشت. این تغییرات احتمالاً ناشی از تشدید واکنش میلارد و تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای در شرایط حرارتی شدیدتر است. با این حال، افزایش بیش از حد شدت برشته‌کردن می‌تواند موجب تیرگی و کاهش مطلوبیت ظاهری محصول شود (Ekhlas et al., 2024).

اثر برشته کردن به روش مادون قرمز بر ظرفیت نگهداری آب (WHC) سوپ گندم

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس اثر فرایند برشته کردن مادون قرمز بر ظرفیت نگهداری آب نشان داد که بین متغیرهای مستقل، توان مادون قرمز (A)، زمان اعمال مادون قرمز (B)، اثر متقابل آن‌ها ($A \times B$) و همچنین توان دوم هر یک از این متغیرها (A^2) و (B^2) در سطح احتمال ۱۰٪ تفاوت معنی‌داری وجود دارد. بر اساس نتایج جدول ۷، مقدار ضریب معنی‌داری (p -value) کمتر از ۰/۱ بیانگر معنی‌دار بودن مدل درجه دو برازش شده است. همچنین غیرمعنی‌دار بودن عدم برازش (Lack of Fit) نشان‌دهنده دقت کافی مدل و توانایی مناسب آن در پیش‌بینی تغییرات ظرفیت نگهداری آب در محدوده شرایط آزمایش است.

تحلیل داده‌ها نشان داد که مدل درجه دوم بهترین پیش‌بینی‌کننده ظرفیت نگهداری آب (WHC) بسته به

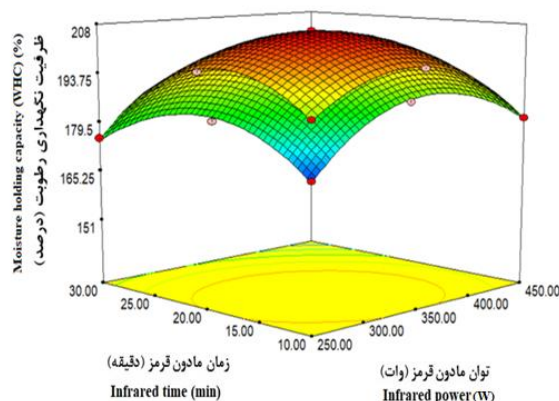
جدول ۷- تجزیه و تحلیل واریانس اثر توان و زمان اعمال مادون قرمز بر ظرفیت نگهداری آب سوپ گندم

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ضریب معنی‌داری
مدل	۵	۱۱/۳۷۷۰	۲/۵۵۴	۰/۰۰۰۱
توان مادون قرمز (A)	۱	۵۰/۳۳۷	۵۰/۳۳۷	۰/۰۰۰۱
زمان اعمال مادون قرمز (B)	۱	۶۷/۶۸۲	۶۷/۶۸۲	۰/۰۰۰۱
اثر متقابل ($A \times B$)	۱	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۰۰۰۸
توان ^۲ (A^2)	۱	۱۰/۵۲۱	۱۰/۵۲۱	۰/۰۰۰۱
زمان ^۲ (B^2)	۱	۶۰/۷۱۸	۶۰/۷۱۸	۰/۰۰۰۱
باقی‌مانده	۵	۷/۶	۱/۲۱	
عدم برازش	۳	۵/۴۰	۱/۸۰	۰/۱۶۰۱ ^{ns}
خطای خالص	۲	۰/۶۷	۰/۳۳	
مجموع کل	۱۰	۱۸/۳۷۷۶		

ns : غیرمعنی‌دار ($p < 0.05$)

اثر برشته کردن مادون قرمز بر ارزیابی حسی

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس اثر فرایند برشته کردن مادون قرمز بر ارزیابی حسی نشان داد که توان مادون قرمز (A)، زمان اعمال مادون قرمز (B)، اثر متقابل آن‌ها ($A \times B$) و همچنین توان دوم هر یک از این متغیرها (A^2) و (B^2) در سطح احتمال ۱۰٪ تأثیر معنی‌داری بر پاسخ ارزیابی حسی دارند (جدول ۸). بر اساس نتایج، مقدار p-value کمتر از ۰/۱ بیانگر معنی‌دار بودن مدل درجه‌دو برازش شده است. همچنین غیرمعنی‌دار بودن عدم برازش (Lack of Fit) نشان‌دهنده دقت مناسب مدل و قابلیت آن در توصیف و پیش‌بینی تغییرات ارزیابی حسی در محدوده شرایط آزمایش می‌باشد.



شکل ۴- میزان تأثیر زمان اعمال مادون قرمز و توان مادون قرمز بر ظرفیت نگهداری آب سوپ گندم

جدول ۸- تجزیه و تحلیل واریانس اثر توان و زمان اعمال مادون قرمز بر امتیاز کلی ارزیابی حسی سوپ گندم

منبع تغییر	درجه آزاد	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ضریب معنی‌داری-p
مدل	۵	۳۲/۹۲	۶/۵۸	۰/۰۰۰۱
توان مادون قرمز (A)	۱	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۰۰۰۲
زمان اعمال مادون قرمز (B)	۱	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۰۰۰۶
اثر متقابل ($A \times B$)	۱	۶/۵۰	۶/۵۰	<۰/۰۰۰۱
توان ^۲ (A^2)	۱	۱۸/۵۰	۱۸/۵۰	<۰/۰۰۰۱
زمان ^۲ (B^2)	۱	۱/۸۴	۱/۸۴	<۰/۰۰۰۱
باقی‌مانده	۵	۰/۰۳۷	۰/۰۰۷۴	—
عدم برازش	۳	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	۰/۲۵۷۶ ^{ns}
خطای خالص	۲	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۳	—
مجموع کل	۱۰	۳۲/۹۶	—	—

ns: غیرمعنی‌دار ($p < 0.05$)

شکل ۵ تأثیر توان و زمان مادون قرمز را بر ارزیابی حسی نشان می‌دهد؛ با افزایش توان از ۲۵۰ به ۳۵۰ وات، امتیاز ارزیابی حسی از ۲/۵ به ۴/۸ افزایش یافت. با افزایش توان تا ۴۵۰ وات، روند افزایشی کند شده و امتیاز به ۵/۹ کاهش یافت که بیانگر کاهش ۳۰٪ نسبت به مقدار بیشینه است. در مورد زمان اعمال مادون قرمز، افزایش زمان از ۱۰ به ۲۰ دقیقه در ابتدا موجب افزایش ارزیابی حسی از ۱/۷ به ۳/۸ شد، اما با گذشت زمان تا ۳۰ دقیقه، امتیاز به ۷/۷ کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد که توان بالای مادون قرمز در مدت زمان طولانی ممکن است ویژگی‌های ارگانولپتیکی مانند بافت و ظاهر محصول را تحت تأثیر قرار دهد (Joudi-Sarighayeh et al., 2023). همچنین رویین و همکاران (Rooyen et al., 2023) در بررسی برشته کردن گندم پیش از آرد کردن را بر

با تحلیل داده‌ها رابطه‌ی (۸) که رابطه واقعی است استخراج شد. همچنین پس از حذف فاکتورهای غیرمعنی‌دار و نرمال‌سازی فاکتورهای باقیمانده از مدل اولیه، رابطه‌ی نهایی که رابطه‌ی کدبندی شده است به صورت رابطه‌ی (۹) ارائه شده است. ضمناً خطای استاندارد و ضریب تغییرات در این مدل ساده شده مقدار ۰/۰۸۶ و ۳۵٪ به دست آمده است.

$$\text{Test Panel} = -38.88004 + 0.21818 \times A + 0.81397 \times B - 1.27500E_{-003} \times A \times B - 2.70263E_{-004} \times A^2 - 8.52632E_{-003} \times B^2 \quad (8)$$

$$\text{Test Panel} = +8.32 + 0.35 \times A + 0.27 \times B - 1.28 \times A \times B - 2.70 \times A^2 - 0.85 \times B^2 \quad (9)$$

شرایط مرزی تعیین شده در نرم افزار در محدوده‌ی مورد نظر در نظر گرفته شدند و بهینه‌سازی آزمایش انجام گرفت. جدول ۹ نتایج این بهینه‌سازی و شرایط مرزی هر متغیر مستقل و وابسته را نشان می‌دهد.

نقطه بهینه شامل توان ۳۶۵/۲۴ وات و زمان ۲۸/۱۸ دقیقه به دست آمد، مقادیر نظریه رطوبت نهایی، میزان شاخص‌های رنگی (L^* , a^* , b^* , ΔE)، ظرفیت نگهداری آب و ارزیابی حسی در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند. برای صحت‌سنجی، آزمایش تأییدی در شرایط بهینه اجرا شد و نقطه بهینه پیشنهادی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت، اختلاف کم بین مقدار بهینه نظری و مقدار تجربی به دست آمده در آزمایشگاه، صحت روش بهینه‌سازی را نشان می‌دهد (جدول ۱۰).

جدول ۹- بهینه‌سازی و شرایط مرزی متغیرهای مستقل و وابسته برشته کردن سویق گندم با روش مادون قرمز

پارامترها	هدف	حد بالا	حد پایین
توان مادون قرمز	در محدوده	۴۵۰	۲۵۰
زمان اعمال مادون قرمز	در محدوده	۳۰	۱۰
رطوبت نهایی	کمینه	۴/۶	۱/۰۵
شاخص رنگی L^*	در محدوده	۸۸/۸۶	۶۵/۷۵
شاخص رنگی a^*	در محدوده	۲۲/۱۵	۱۲/۸۱
شاخص رنگی b^*	در محدوده	۱۷/۳۱	۹/۷۵
شاخص رنگی ΔE	کمینه	۲۵/۷۴	۲/۵۲
ظرفیت نگهداری آب	بیشینه	۲۰۶	۱۵۲
ارزیابی حسی	بیشینه	۸/۴	۲/۹

جدول ۱۰- مقادیر نظریه و تجربی متغیرهای وابسته در نقطه بهینه برشته کردن با روش مادون قرمز سویق گندم

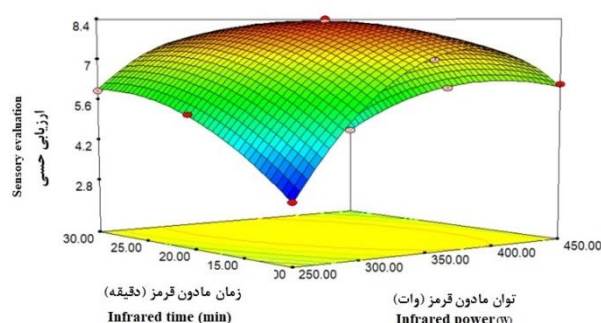
متغیر وابسته	تجربی	نظریه
رطوبت نهایی	۳/۰۸	۳/۳۹
شاخص رنگی L^*	۸۸/۲۲	۸۱/۵۷
شاخص رنگی a^*	۱۳/۷۸	۱۳/۵۷
شاخص رنگی b^*	۱۷/۳۲	۱۶/۸۴
شاخص رنگی ΔE	۱۰/۵۵	۹/۷۷
ظرفیت نگهداری آب	۲۱۲/۸۶	۲۰۴/۶۹
ارزیابی حسی	۸/۶۵	۸/۲۷

تصویر الکترونی روبشی

نتایج بررسی مورفولوژی (Morphology) و ساختار سطحی نمونه سویق برشته شده در شرایط بهینه با استفاده از ریزبین الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۶ به منظور توصیف اثر

ویژگی‌های عملکردی آرد مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که افزایش دما و زمان برشته کردن، موجب افزایش نشاسته آسیب دیده و تشکیل کمپلکس‌های آمیلولپید (Amylolipid) شده و این تغییرات ساختاری، ویسکوزیته و رفتار رئولوژیک (Rheological) خمیر را بهبود می‌بخشد. بر اساس بهینه‌سازی با مدل سازی RSM، شرایط حدود ۱۱۵ درجه سلسیوس و ۱۶۵ ثانیه به عنوان سطح بهینه تعیین شد؛ با این وجود، شدت گرمایش بیش از حد، کاهش پذیرش حسی به ویژه به دلیل ایجاد طعم سوختگی را به دنبال داشت (Rooyen et al., 2023).

بیشترین پذیرش حسی در شرایط متوسط با نتایج آونگ و همکاران (۲۰۲۲) درباره برشته کردن گندم جوانه زده مطابقت داشت. برشته کردن متوسط موجب ایجاد رنگ، عطر و طعم مطلوب می‌شود، در حالی که حرارت بیش از حد می‌تواند طعم سوختگی، تلخی و افت پذیرش حسی را به همراه داشته باشد (Aung et al., 2022).

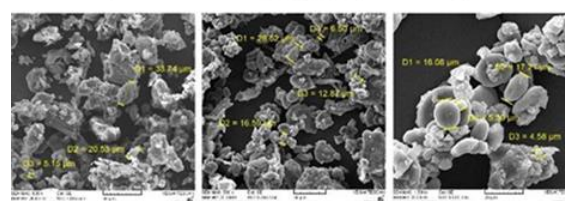
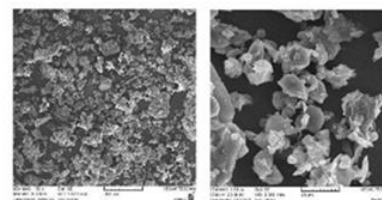


شکل ۵- تأثیر زمان اعمال مادون قرمز و توان مادون قرمز بر ارزیابی حسی سویق گندم

بهینه‌سازی فرایند برشته کردن سویق گندم به روش مادون قرمز

بهینه‌سازی هم‌زمان پاسخ‌ها با استفاده از روش تابع مطلوبیت (Desirability function) در چارچوب روش سطح پاسخ سویق گندم انجام شد. در این فرایند، با توجه به اهمیت تمامی پاسخ‌ها در کیفیت نهایی سویق گندم در فرایند بهینه‌سازی وزن یکسان برای پاسخ‌ها در نظر گرفته شدند. بهینه‌سازی برای پاسخ‌ها بر اساس ماهیت آن‌ها تعیین شد؛ با هدف کمینه کردن میزان رطوبت نهایی، ΔE و بیشینه کردن متغیرهای ظرفیت نگهداری آب و ارزیابی حسی، متغیرهای مستقل آزمایش (زمان اعمال مادون قرمز و توان مادون قرمز) تحت

روش مادون قرمز بر ساختار ذرات ارائه شده است. تصاویر SEM نشان می‌دهد که ذرات دارای اندازه‌ای در محدوده ۴/۵۸ تا ۳۳/۷۴ میکرومتر بوده و سطحی ناهمگن و نسبتاً متخلخل را نشان می‌دهند. مشاهده ترک‌های ریز و نواحی نامنظم در سطح ذرات بیانگر تغییرات ساختاری در نمونه بهینه‌شده می‌باشد.



شکل ۶- تصویر الکترونی روبشی سوپک گندم در برشته کردن با مادون قرمز تحت شرایط بهینه

تحلیل مرحله‌ای ارزیابی حسی سوپک گندم

مدل مرحله‌ای توانست پذیرش کلی سوپک گندم را با بر اساس ویژگی‌های حسی پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد که در این مدل، طعم و بافت بیشترین تأثیر را بر پذیرش کلی سوپک گندم داشتند. چهار متغیر ورودی شامل رنگ، عطر، طعم و بافت بود که هر کدام به پنج سطح زبانی (Very Low تا Very High) تقسیم شدند و خروجی نیز پذیرش کلی در همان سطوح بود. با استفاده از داده‌های آزمون حسی، ۲۰ قانون مرحله‌ای طراحی شد که ترکیب‌های مختلف ورودی را پوشش داده و پذیرش کلی را پیش‌بینی می‌کنند.

مدل مرحله‌ای با دقت بالایی توانست روند کلی تغییرات پذیرش کلی را در سطوح مختلف ویژگی‌های حسی بازتولید کند. نتایج نشان داد که طعم و بافت، مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی پذیرش کلی هستند. در اغلب مواردی که طعم و بافت در سطح پایین یا خیلی پایین بودند، حتی رنگ و عطر عالی نتوانستند پذیرش را به سطح بالاتر ارتقا دهند (قوانین ۱۱ و ۱۷). رنگ و عطر اگرچه نقش مهمی در ایجاد تمایل اولیه دارند، اما اثر آن‌ها بر پذیرش نهایی به اندازه طعم و بافت تعیین‌کننده نیست. برای مثال، در ۱۰ علی‌رغم رنگ Very High، ضعف شدید عطر Very Low پذیرش را به سطح

Medium کاهش داد. در ترکیب سطوح متوسط و پایین، مدل نشان داد هرچه حداقل دو ویژگی از چهار ویژگی در سطح Medium یا بالاتر باشند، پذیرش کلی از Very Low به Low یا Medium تغییر می‌کند (قوانین ۸ و ۱۲). از تحلیل ماتریس حساسیت قوانین، مشخص شد که تغییر طعم از Low به High بیشترین تأثیر مثبت را در تغییر پذیرش کلی از Low به High داشته است (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- قانون مرحله‌ای برای پیش‌بینی پذیرش کلی سوپک گندم

قانون	پذیرش کلی	بافت	طعم	عطر	رنگ
۱	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار
۲	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
۳	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۴	کم	کم	کم	کم	کم
۵	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار
۶	کم	کم	کم	کم	کم
۷	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
۸	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۹	کم	کم	کم	کم	کم
۱۰	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۱	کم	کم	کم	کم	کم
۱۲	متوسط	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار
۱۳	کم	کم	کم	کم	کم
۱۴	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
۱۵	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۶	زیاد	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار
۱۷	کم	بسیار	بسیار	بسیار	بسیار
۱۸	بسیار	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۹	متوسط	کم	کم	کم	کم
۲۰	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط

به‌طور کلی قوانین به سه دسته طبقه‌بندی شدند:

آن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی سوپق گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش توان و زمان اعمال مادون‌قرمز منجر به کاهش معنی‌دار رطوبت نهایی محصول می‌شود. کاهش رطوبت نهایی می‌تواند به طور بالقوه به افزایش ماندگاری و کاهش مخاطرات میکروبی کمک کند؛ با این حال، تأیید این موضوع نیازمند آزمون‌های ماندگاری و میکروبی است. شاخص‌های رنگی نیز با افزایش شدت تیمار حرارتی تغییر یافتند؛ به‌طوری‌که افزایش مقادیر a^* و b^* حاکی از بروز تغییرات رنگی مرتبط با فرایندهای قهوه‌ای شدن و ایجاد ظاهر مطلوب‌تر محصول است.

نتایج نشان داد که ظرفیت نگهداری آب در توان‌ها و زمان‌های ملایم تا متوسط افزایش یافته، اما در شرایط شدیدتر روند کاهشی نشان می‌دهد که می‌تواند با تغییرات ساختاری نمونه در شرایط فرایندی مختلف مرتبط باشد. ارزیابی حسی بیانگر آن بود که شرایط حرارتی ملایم تا متوسط منجر به بهبود طعم، رنگ، عطر و بافت و افزایش پذیرش کلی محصول می‌شود، درحالی‌که اعمال توان و زمان‌های بالا می‌تواند کیفیت حسی را تحت تأثیر منفی قرار دهد. بر اساس بهینه‌سازی چند پاسخ، شرایط بهینه فرایند در توان ۳۶۵/۲۴ وات و زمان ۲۸/۱۸ دقیقه تعیین شد؛ که تعادل مناسبی میان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و پذیرش حسی ایجاد نمود. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرایند برشته کردن مادون‌قرمز می‌تواند به‌عنوان روشی سریع و قابل‌کنترل برای تولید سوپق گندم باکیفیت فیزیکوشیمیایی و حسی مطلوب موردتوجه قرار گیرد، هرچند بررسی‌های تکمیلی برای ارزیابی دقیق‌تر جنبه‌های ساختاری و صنعتی فرایند پیشنهاد می‌شود. تحلیل داده‌های حسی مبتنی بر منطق مرحله‌ای نشان داد که بهبود هم‌زمان برخی صفات کلیدی مانند طعم و بافت، حتی در صورت ثابت‌بودن سایر ویژگی‌ها در سطح متوسط، می‌تواند پذیرش کلی محصول را افزایش دهد. در این راستا، مدل مرحله‌ای توسعه‌یافته به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی پذیرش حسی بر اساس داده‌های تجربی معرفی می‌شود و می‌تواند در انتخاب شرایط فرایندی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

محدودیت‌های پژوهش

از محدودیت‌های این پژوهش تعداد محدود ارزیابان آموزش‌دیده بود، بنابراین، تعمیم نتایج حسی به جامعه

۱- قوانین همگن: ۱ تا ۵ تمام ویژگی‌ها در یک سطح مشابه (پذیرش مطابق همان سطح).

۲- قوانین متضاد ۹، ۱۰، ۱۳ و ۱۴ تضاد شدید بین برخی ویژگی‌ها (پذیرش متأثر از میانگین اثر ویژگی‌ها).

۳- قوانین میانه: ۱۱ قانون ترکیب سطوح متوسط و متفاوت (پذیرش متعادل یا متمایل به سمت ویژگی‌های غالب).

یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های حسی و مدل‌سازی مرحله‌ای نشان داد که بین ویژگی‌های حسی مختلف، طعم و بافت بیشترین تأثیر را در تعیین پذیرش کلی داشتند. در نمونه‌هایی که طعم یا بافت در سطح پایین یا خیلی پایین بودند، حتی ویژگی‌هایی مانند رنگ و عطر در سطوح بالا نتوانستند پذیرش کلی محصول را به سطح مطلوبی ارتقا دهند. این موضوع تأکید می‌کند که ویژگی‌های مرتبط با احساس دهانی و مزه، نقش تعیین‌کننده‌ای در مقبولیت نهایی سوپق دارند و بهینه‌سازی آن‌ها باید اولویت تولیدکنندگان باشد.

بررسی قوانین متضاد مانند ۹ و ۱۳ نشان داد که رنگ به‌تنهایی نمی‌تواند ضعف سایر ویژگی‌ها را جبران کند. در مقابل، عطر، طعم و بافت اگر به سطح بسیار بالایی برسند، حتی رنگ ضعیف نیز مانع از رسیدن پذیرش به سطح متوسط نمی‌شود. این موضوع بیانگر اهمیت ثانویه رنگ در پذیرش نهایی سوپق است و نشان می‌دهد مصرف‌کنندگان در قضاوت پایانی، بیشتر به کیفیت حسی درونی محصول متکی‌اند تا ظاهر آن. از نظر بازاریابی، این یافته می‌تواند به تولیدکنندگان کمک کند هزینه‌های غیرضروری روی بهبود صرفاً رنگ محصول را کاهش داده و تمرکز خود را بر بهبود طعم و بافت بگذارند. تحلیل دقیق قواعد مرحله‌ای در کنار داده‌های تجربی نشان داد بهبود هم‌زمان ویژگی‌های طعم و بافت، حتی در صورت حفظ عطر و رنگ در سطح متوسط، می‌تواند پذیرش کلی سوپق را به سطوح بالاتر برساند.

این امر بیانگر پتانسیل بهینه‌سازی فرایند برشته کردن (ازجمله تنظیم زمان و دما) برای تولید محصولی با ویژگی‌های مطلوب‌تر است. اهمیت بیشتر طعم و بافت با نتایج پاورانی و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی مرحله‌ای محصولات غذایی همسو بود. این نتیجه نشان می‌دهد که ویژگی‌های مرتبط با تجربه مصرف در دهان، نسبت به رنگ و عطر نقش بیشتری در پذیرش کلی محصول دارند (Pavani et al., 2023).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرایند برشته کردن با امواج مادون‌قرمز و اثر

determination of moisture content in feed ingredients. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(11), 1615–1622.

<https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14305>

Amin-Ekhlās, S., Pajohi-Alamoti, M., & Salehi, F. (2024). Effect of ultrasonic and infrared treatments on microbial population, physicochemical properties, and total phenols of sprouted wheat powder. *Innovative Food Technologies*, 11(3), 197–210. (In Persian).

<https://doi.org/10.22104/ift.2024.6712.2166>

Anumudu, C. K., Onyeaka, H., Ekwueme, C. T., Hart, A., Isaac-Bamgboye, F., & Miri, T. (2024). Advances in the application of infrared in food processing for improved food quality and microbial inactivation. *Foods*, 13(24), 4001.

<https://doi.org/10.3390/foods13244001>

Asiedu, B. K., Afoakwa, E. O., Osei Tutu, C., Obeng, R., Kortei, N. K., Akonor, P. T., Budu, A. S., & Saalia, F. K. (2025). Effect of roasting on flavonoids, phenolics, and antioxidant activity of industrial-pulped and fermented cocoa beans. *Food Chemistry Advances*, 6, 100925.

<https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100925>

Aung, T., Kim, B. R., & Kim, M. J. (2022). Optimized roasting conditions of germinated wheat for a novel cereal beverage and its sensory properties. *Foods*, 11(3), 481. <https://doi.org/10.3390/foods11030481>

Bagheri, H. (2020). Application of infrared heating for roasting nuts. *Journal of Food Quality*, 2020, 8813047. <https://doi.org/10.1155/2020/8813047>

Bagheri, H., Kashani Nejad, M., A'alami, M., & Ziaieifar, A. M. (2019). Optimization of peanut kernel roasting conditions with hot air using response surface methodology. *Journal of Food Sciences and Nutrition*, 16(2), 33–44. (In Persian).

Batariuc, A., Coțovanu, I., & Mironcasi, S. (2023). Sorghum flour features related to dry heat treatment and milling. *Foods*, 12(11), 2248.

<https://doi.org/10.3390/foods12112248>

Berton, B., Scher, J., Villieras, F., & Hardy, J. (2002). Measurement of hydration capacity of wheat flour: Influence of composition and physical characteristics. *Powder Technology*, 128(2–3), 326–331. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00168-7)

Chobot, M., Kozłowska, M., Ignaczak, A., & Kowalska, H. (2024). Development of drying and roasting processes for the production of plant-based pro-healthy snacks in the light of nutritional trends and sustainable techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104553.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104553>

El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A., & Bou-Maroun, E. (2025). Maillard reaction: Mechanism, influencing parameters, advantages, disadvantages, and food industrial applications: A review. *Foods*, 14(11), 1881. <https://doi.org/10.3390/foods14111881>

مصرف‌کنندگان نیازمند مطالعاتی با تعداد بیشتر ارزیابان، آزمون مصرف‌کننده است.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی، همکاری‌های فنی و راهنمایی‌های ارزشمند ابراز می‌دارند.

مشارکت نویسندگان

۲. نویسنده اول: تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی،

تحلیل رسمی، نوشتن - پیش‌نویس اصلی.

۳. نویسنده دوم: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، مدیریت

پروژه، نظارت، تحلیل رسمی، اعتبارسنجی، نوشتن - بررسی

و ویرایش.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست، در اختیار قرار خواهند گرفت.

اصول اخلاقی

این مقاله مطابق با اصول اخلاقی پژوهش تدوین شده است و تمامی استانداردهای مربوط به امانت‌داری علمی، اصالت محتوا و ارجاع‌دهی رعایت شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در ارتباط با انتشار این مقاله وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌ها یا نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

منابع

Ahmad, M., Baba, W. N., Wani, T. A., Gani, A., Gani, A., Shah, U., Wani, S. M., & Masoodi, F. A. (2015). Effect of green tea powder on thermal, rheological & functional properties of wheat flour and physical, nutraceutical & sensory analysis of cookies. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5799–5807. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1701-3>

Ahn, J. Y., Kil, D. Y., Kong, C., & Kim, B. G. (2014). Comparison of oven-drying methods for

- Northern Red Oak (*Quercus rubra* L.) seeds affected by roasting conditions. *Molecules*, 28(5), 2299. <https://doi.org/10.3390/molecules28052299>
- Pande, S., Sakhare, S. D., Bhosale, M. G., Haware, D. J., & Inamdar, A. A. (2017). Atta (whole wheat flour) with multi-wholegrains: Flour characterization, nutritional profiling and evaluation of chapati making quality. *Journal of Food Science and Technology*, 54(11), 3451–3458. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2801-7>
- Pavani, M., Singha, P., Rajamanickam, D. T., & Singh, S. K. (2023). Exploration of foods and foodomics application of fuzzy logic techniques for sensory evaluation of plant-based extrudates fortified with bioactive compounds. *Exploration of Foods and Foodomics*, 1, 272–287. <https://doi.org/10.37349/eff.2023.00021>
- Rooyen, J., Marini, F., Orth, S. H., Oyeyinka, S. A., Simsek, S., & Manley, M. (2023). Effect of wheat roasting conditions and wheat type on short-wave infrared (SWIR) spectral data of whole and milled wheat by ANOVA-simultaneous component analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 303, 123160. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123160>
- Selvi, K. Ç., Kabutey, A., Gürdil, G. A., Herak, D., Kurhan, Ş., & Klouček, P. (2020). The effect of infrared drying on color, projected area, drying time, and total phenolic content of rose petals. *Plants*, 9(2), 236. <https://doi.org/10.3390/plants9020236>
- Sruthi, N. U., Premjit, Y., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Ramesh, S. V. (2021). An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures. *Food Chemistry*, 348, 129088. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129088>
- Sztupecski, W., Rhazi, L., Depeint, F., & Aussenac, T. (2023). Functional and nutritional characteristics of natural or modified wheat bran non-starch polysaccharides: A literature review. *Foods*, 12(14), 2693. <https://doi.org/10.3390/foods12142693>
- Harisha, R., Ahlawat, A. K., Balakrishnan, A. P., Bhavya, B., Singhal, S., Manjunath, K. K., Harshitha, B. S., Shekharappa, N., Sonu, & Singh, V. J. (2025). Exploring the intricate interplay between the physico-chemical and biochemical properties of grain, refined wheat flour, and whole wheat flour in determining chapati quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Applied Food Research*, 5(1), 100956. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100956>
- He, H.-J., Li, G., Obadi, M., & Ou, X. (2025). Recent advances in heat-induced wheat protein modifications. *Food Chemistry: X*, 29, 102625. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102625>
- Joudi-Sarighayeh, F., Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., Szymanek, M., & Kulig, R. (2023). Response surface methodology approach for predicting convective/infrared drying, quality, bioactive and vitamin C characteristics of pumpkin slices. *Foods*, 12(5), 1114. <https://doi.org/10.3390/foods12051114>
- Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1053196. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>
- King, J., Leong, S. Y., Alpos, M., Johnson, C., McLeod, S., Peng, M., Sutton, K., & Oey, I. (2024). Role of food processing and incorporating legumes in food products to increase protein intake and enhance satiety. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104466. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104466>
- Li, C., Tian, Y., Liu, C., Dou, Z., & Diao, J. (2023). Effects of heat treatment on the structural and functional properties of *Phaseolus vulgaris* L. protein. *Foods*, 12(15), 2869. <https://doi.org/10.3390/foods12152869>
- Morshedi, A., Razavi, S. M. A., Kashaninejad, M., Shaker Ardakani, A., & Mostafavi, A. (2018). Important Iranian pistachio kernel cultivars infrared roasting optimization by RSM. *Innovative Food Technologies*, 6(1), 121–136. (In Persian). <https://doi.org/10.22104/jift.2017.2280.1534>
- Mukunzi, Y., & Aryee, A. N. A. (2025). Effect of dry roasting on the physicochemical, nutritional, and techno-functional properties of tri-color quinoa flours. *Foods*, 14(18), 3237. <https://doi.org/10.3390/foods14183237>
- Narra, F., Piragine, E., Benedetti, G., Ceccanti, C., Florio, M., Spezzini, J., Troisi, F., Giovannoni, R., Martelli, A., & Guidi, L. (2024). Impact of thermal processing on polyphenols, carotenoids, glucosinolates, and ascorbic acid in fruit and vegetables and their cardiovascular benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(6), e13426. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13426>
- Oracz, J., Prejzner, M., Grzelczyk, J., Kowalska, G., & Żyżelewicz, D. (2023). Bioactive compounds, antioxidant activity and sensory properties of

