



Development of a machine vision system for examining mushroom frying using deep frying and hot air methods

Donya Farajzadeh¹ | Seyed Saeid Mohtasebi² | Mahmoud Soltani Firuz³ | Erfan Dehghan Banadaki⁴

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran Email: donya.farajzadeh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: mohtaseb@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: mahsoltani@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: erfan.dehghan@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 17, 2025

Revised: Sep. 29, 2025

Accepted: Oct. 15, 2025

Published online: Autumn 2025

Keywords:

Hot air,

Mushroom,

Principal component analysis,

Support vector machine.

ABSTRACT

Considering the high popularity of fried foods among people, this type of food is among the most consumed. After frying food products, certain changes appear in the products depending on the frying method used. This research introduces an innovative method for quantifying the quality of mushroom frying. In this study, machine vision was used to non-destructively evaluate two frying methods: deep frying and air frying for mushrooms. For frying the mushrooms, three levels of temperature and time were considered, with four repetitions for each level. After frying the mushrooms using the specified method, the samples were placed in the machine vision system, where the degree of shrinkage, color, and texture resulting from frying were examined. By utilizing image processing and identifying brown and yellow color regions, the percentage of frying was quantitatively calculated. Ultimately, this helps in better analyzing qualitative changes in food products. Examining various frying methods for food products can provide practical information to consumers. The data were analyzed after applying the necessary processing for machine vision. Using Principal Component Analysis (PCA), the first two principal components, PC-1 and PC-2, explained 99.89% and 0.11% of the data variance, respectively. Additionally, Linear Discriminant Analysis (LDA) and Support Vector Machine (SVM) techniques achieved an accuracy of 100%. To evaluate the classification ability of the images considering the degree of shrinkage and color, statistical indices such as accuracy, recall rate, and F1 score were used. In this evaluation, the accuracy, recall rate, and F1 score for classifying the frying methods for mushrooms were all 100%. These results indicate the high capability of classifying deep frying and air frying methods for mushroom products.

Cite this article: Farajzadeh, D., Mohtasebi, S.S., Soltani Firuz, M., Dehghan Banadaki, E., (2025) Development of a machine vision system for examining mushroom frying using deep frying and hot air methods, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (3), 83-98. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398160.665599>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398160.665599>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, fried foods have gained significant popularity among people. Given the high consumption of fried foods, the health implications of using these products are important for many consumers. On the other hand, the healthiness of fried foods fundamentally depends on the quality of the frying oil and the method of frying the food. Fried products are delicious when cooked in oil, but they can also pose major health issues for consumers, including concerns related to calories, high cholesterol, cardiovascular diseases, changes in the structure and stability of the oil used, as well as an increase in trans fatty acids in repeatedly used oils. Exposure of oil to high temperatures and environmental air increases oxidation and produces toxic substances. Additionally, the shelf life of fried food decreases due to the oxidation of the oil (Michalak-Majewska et al., 2018). The global trend towards healthy eating has led to the development of new technologies that can preserve or enhance the quality characteristics of fried foods (Abd Rahman et al., 2016; anonymous, 2023). With the emergence of certain changes resulting from frying products using various methods, including deep frying and air frying, examining these frying methods can provide useful information for consumers regarding the appropriate choice of frying technique. This can significantly assist in satisfying consumers of fried food products. Analyzing the differences between various frying methods has been challenging for consumers. On one hand, deep frying offers better flavor and aroma, while on the other hand, air frying results in less oil absorption and improved quality of the fried product. These advantages and disadvantages of the two frying methods underscore the necessity for a scientific comparison between them. Many activities have been developed using machine vision technology in agricultural sectors (Kamilaris et al., 2018). This is because machine vision systems not only recognize the size, shape, color, and texture of objects but also provide numerical features of the objects or scenes being imaged. Developing a machine vision-based system to examine deep frying and air frying of mushrooms allows for a more precise evaluation of the visual characteristics and final quality of the food. This automated and comprehensive approach enables deeper analysis compared to traditional assessment methods. Using machine vision systems, qualitative and quantitative data can be simultaneously collected and analyzed. This feature allows for a more detailed examination of the two frying methods for mushrooms. The goal of this research is to utilize machine vision to study the frying of mushrooms using both deep frying and air frying methods. The innovation of this study lies in transforming the qualitative properties of frying into measurable quantitative values. By using image processing to identify brown and yellow color regions and calculating statistical parameters for these areas, the percentage of frying of the mushrooms can be quantified. This approach enables consumers to express the quality of frying in a quantitative and comparable manner, leading to better choices regarding frying methods. Ultimately, this research addresses the challenge of making a better choice between deep frying and air frying by presenting results from frying mushrooms using both methods. While some studies have focused on the nutritional impacts of frying methods, this research delves deeper into the relationship between visual quality and nutritional value.

Method

In this study, 3 kg of fresh button mushrooms were purchased from Delsa Alborz Company. To continue the experiment, the mushrooms were weighed and grouped according to frequency. The number and weight of each in each group were recorded, and for each experiment, 3 mushrooms were considered according to the grouping based on frequency. The frequency of the number of mushrooms was approximately 9, 13, and 17 grams. According to this weighing, these three approximate weights were considered the grouping criteria, with each group having a weight difference of approximately 4 grams compared to the previous group. In order to show the apparent changes based on the different weights after frying the mushrooms, one mushroom was selected from each group in each experiment. This reduced the total weight difference. (The number of tested mushrooms was 12 for each temperature, and a total of 72 for both frying methods, depending on the repetition.) After grouping, each of the grouped groups was gently washed. After washing, the mushrooms were dried and prepared for frying. 4 replicates were considered for analysis and better results at each temperature and time level.

Process of Air Frying

In this experiment, a hot air fryer was used for frying the mushrooms using the air frying method. The Tefal hot air fryer (model EY 801, manufactured in China with a power consumption of 1650 watts) was selected for hot air frying. The process of frying the mushrooms using the air frying method was carried out at temperatures of 170, 180, and 190 degrees Celsius, with three time levels of 10, 8, and 6 minutes (Basuny & Oatibi, 2016). These experiments were conducted with four repetitions for each temperature and time setting.

Process of Deep Frying

For frying the mushrooms, temperatures of 170, 180, and 190 degrees Celsius were used, with three time levels of 3, 2, and 1 minutes (Li et al., 2019). Four repetitions were considered for each temperature and time setting. To fry the mushrooms, the container was filled with 2 liters of oil. Once the oil reached the desired experimental temperature, the mushrooms were placed into the oil-filled container of the device. After frying at each specified temperature and time level, the weight of each mushroom was recorded.

Machine Vision System

The imaging process begins. For imaging, uniform lighting and photography settings are applied, and the sample is positioned for capturing images. The sample placement is rotating, allowing for imaging from various angles. The capability of capturing a series of images is utilized by holding down the volume up button on the mobile device for better imaging of the mushrooms. The mushrooms are placed on a rotating platform with the side that has the most details facing the camera, and imaging is performed from the top area to ensure that the maximum details are obtained.

Principal Component Analysis (PCA) in Machine Vision

After preprocessing, PCA is used to analyze the resulting data. PCA is a dimensionality reduction technique that help project data into a lower-dimensional space while preserving the maximum variance. This method can aid in reducing computational time and improving the performance of the proposed image processing models.

Linear Discriminant Analysis (LDA) in Machine Vision

LDA works to find a linear combination of features that maximizes the separation between two classes (frying methods). This algorithm calculates the mean of the features for each class and performs the separation based on between-class and within-class variances.

Support Vector Machine (SVM) Analysis in Machine Vision

After data reduction, the SVM method can be employed. The SVM model learns the features between images of both frying methods. Once the model is trained, it can be used to predict the classification of new images.

Results

This system calculates the percentage of frying numerically by identifying brown and yellow regions in images, computing statistical parameters, and weighting them through calculations in a mathematical model. This feature allows for a more precise comparison of the frying quality across different methods. Overall, this research demonstrates the high effectiveness of using machine vision systems to detect differences between deep frying and air frying methods. It can serve as an effective tool for developing intelligent systems that assess the degree of frying and enhance the quality evaluation processes of food products. These results can assist both producers and consumers in selecting the best frying methods and improving the final quality of fried foods, ultimately leading to enhanced health and satisfaction for consumers.

Conclusions

Existing research has mostly been theoretical or conducted on a small scale, with less focus on industrial and commercial applications. This study and the expansion of research in this field can lead to the development of a practical system to create a standardized tool for the food industry, helping producers improve the quality of their fried products. Additionally, the implementation of this system and the expansion of research in this area could establish new standards for evaluating the quality of fried foods, ultimately enhancing the quality and safety of food products.

The use of modern methods such as machine vision systems holds particular appeal for consumers. Consumers are always looking for fried products that have the right texture, acceptable appearance, and are also satisfactory in taste and aroma. In air frying mushrooms, the mushrooms exhibit a more cohesive texture due to less moisture loss compared to those fried using the deep frying method. In deep frying, the texture of the mushrooms showed more wrinkling, and in terms of color, deep frying caused the mushrooms to darken towards a deeper yellow and brown color. In contrast, mushrooms fried using the air frying method had a yellowish hue, and in terms of appearance, the oil absorption in deep-fried mushrooms was high, to the extent that this amount of oil can be detrimental to the health of consumers and significantly affects the flavor of the mushrooms.

One of the key innovations of this research is the ability to quantitatively assess the doneness of mushrooms through color and texture analyses. This system calculates the percentage of frying numerically by identifying brown and yellow regions in images, computing statistical parameters, and weighting them



through calculations in a mathematical model. This feature allows for a more precise comparison of the frying quality across different methods.

Author Contributions

Donya Farajzadeh: Writing – original draft, Methodology, Data curation, Software, Formal analysis.

Seyed Saeid Mohtasebi: Review and editing, conceptualize, supervise, and manage project administration.

Mahmoud Soltani Firuz: review and editing, Formal analysis, Investigation, Validation.

Erfan Dehghan Banadaki: Writing, review and editing, Formal analysis, Data curation, Validation.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors. All the data used in this original research are presented throughout the text and in the form of Tables and Figures.

Acknowledgements

Thank you to all those who have collaborated in this research

Ethical considerations

The author declares no conflict of interest.

توسعه یک سامانه بینایی ماشین برای بررسی سرخ کردن قارچ به روش عمیق و هوای داغ

دنیا فرج زاده^۱ | سید سعید محتسبی^۲ | محمود سلطانی فیروز^۳ | عرفان دهقان بنادکی^۴

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

donya.farajzadeh@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

mohtaseb@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

mahsoltani@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

erfan.dehghan@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۳

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

تحلیل مولفه‌های اصلی،

تحلیل ماشین بردار پشتیبان،

قارچ، هوای داغ.

با توجه به محبوبیت غذاهای سرخ شده در میان مردم، این نوع غذاها جزء پرمصرف‌ترین نوع غذاها محسوب می‌شوند. پس از سرخ کردن محصولات غذایی، برخی تغییرات با توجه به نوع سرخ شدن بر روی محصولات نمایان می‌شود. این تحقیق به معرفی یک روش نوآورانه برای کمی‌سازی کیفیت سرخ شدن قارچ‌ها می‌پردازد. در این پژوهش از بینایی ماشین، به منظور ارزیابی غیرمخرب دو روش سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ برای بررسی قارچ استفاده شده است. برای سرخ کردن قارچ‌ها، سه سطح دما و زمان، با چهار تکرار در هر سطح، در نظر گرفته شد. پس از سرخ شدن قارچ‌ها به روش مورد نظر، نمونه‌ها در سامانه بینایی ماشین قرار گرفته و میزان چروکیدگی، رنگ و بافت حاصل از سرخ شدن بررسی گردید. با استفاده از پردازش تصویر و شناسایی نواحی رنگی قهوه‌ای و زرد، درصد سرخ شدن به شکل کمی (عددی) محاسبه می‌شوند. در نهایت به تحلیل بهتر تغییرات کیفی در محصولات غذایی کمک می‌کند. بررسی برخی از روش‌های سرخ کردن محصولات غذایی می‌تواند اطلاعات کاربردی را در اختیار مصرف کنندگان قرار دهد. داده‌ها پس از اعمال پردازش‌های لازم برای بینایی ماشین، تحلیل شدند. با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، دو مولفه اصلی PC-1 و PC-2 به ترتیب ۹۹٫۸۹٪ و ۰٫۱۱٪ از واریانس داده‌ها را توضیح دادند. علاوه بر این، تکنیک‌های تحلیل تفکیک خطی (LDA) و تحلیل ماشین بردار پشتیبان (SVM) به دقت ۱۰۰٪ دست یافتند. برای ارزیابی توانایی کلاس‌بندی تصاویر با در نظر گرفتن میزان چروکیدگی و رنگ، از شاخص‌های آماری نظیر صحت، نرخ بازیابی و امتیاز F1 استفاده شد. در این ارزیابی میزان صحت، نرخ بازیابی و امتیاز F1 برای کلاس‌بندی روش‌های سرخ کردن قارچ ۱۰۰٪ بوده است. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای کلاس‌بندی روش‌های سرخ کردن عمیق و هوای داغ در محصول قارچ می‌باشد.

استناد: فرج زاده، دنیا؛ ؛ محتسبی، سید سعید؛ سلطانی فیروز، محمود و دهقان بنادکی، عرفان (۱۴۰۴). توسعه یک سامانه بینایی ماشین برای بررسی سرخ کردن قارچ به

روش عمیق و هوای داغ، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۶ (۳)، ۹۸-۸۳. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398160.665599>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398160.665599>

مقدمه

امروزه غذاهای سرخ شده در میان مردم محبوبیت زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به پر مصرف بودن غذاهای سرخ شده، سلامت استفاده از این محصولات، برای خیلی از مصرف‌کنندگان مهم می‌باشد؛ از طرفی سلامت غذای سرخ شده اساساً به کیفیت روغن سرخ‌کردنی و روش سرخ شدن مواد غذایی بستگی دارد. محصولات سرخ شده در روغن لذیذ هستند، اما در عین حال می‌توان به مشکلات عمده‌ای برای سلامت مصرف‌کنندگان از جمله مشکلات مربوط به کالری، کلسترول بالا، بیماری قلبی و عروقی، تغییر در ساختار و پایداری روغن بکار رفته، همچنین بالا رفتن میزان اسید چرب ترانس در روغن‌های چند بار مصرف شده، اشاره نمود. قرار گرفتن روغن در معرض دمای بالا و هوای محیط، میزان اکسیداسیون را افزایش می‌دهد و مواد سمی تولید می‌کند. از طرفی عمر نگهداری ماده غذایی سرخ شده به علت اکسیداسیون روغن کاهش می‌یابد (Michalak-Majewska et al., 2018). گرایش جهانی به سمت مصرف غذای سالم، منجر به توسعه فناوری‌های جدیدی شده است که می‌تواند ویژگی‌های کیفی غذاهای سرخ‌شده را حفظ کند یا بهبود بخشد (Abd Rahman et al., 2016; anonymous, 2023).

با ظاهر شدن برخی از تغییرات حاصل از سرخ‌کردن محصول در روش‌های مختلف از جمله سرخ‌کردن عمیق و هوای داغ، بررسی روش‌های سرخ‌کردن می‌تواند اطلاعات مفیدی را از بابت انتخاب درست برای روش سرخ‌کردن در اختیار مصرف‌کنندگان بدهد. این موضوع می‌تواند کمک شایانی در راستای جلب رضایت مصرف‌کننده محصول غذایی سرخ شده، برای مصرف‌کننده به همراه داشته باشد. بررسی تفاوت‌ها میان روش‌های مختلف سرخ‌کردن، برای مصرف‌کنندگان چالش برانگیز بوده است. از طرفی طعم و عطر بهتر در روش سرخ‌کردن عمیق و از طرفی دیگر جذب روغن کمتر و بهبود بخشیدن کیفیت محصول سرخ شده از طریق سرخ‌کردن با هوای داغ و برخی دیگر از این مزایا و معایب حاصل از سرخ‌کردن در این دو روش، ضرورت مقایسه علمی این دو روش سرخ‌کردن را می‌رساند.

بسیاری از فعالیت‌ها با استفاده از فناوری بینایی‌ماشین در بخش‌های کشاورزی توسعه یافته‌اند (Kamilaris et al., 2018). این موضوع به دلیل این است که سامانه بینایی‌ماشین نه تنها اندازه، شکل، رنگ و بافت اشیاء را تشخیص می‌دهند، بلکه ویژگی‌های عددی اشیاء یا صحنه‌های مورد تصویر را نیز ارائه می‌دهند. توسعه یک سامانه مبتنی بر بینایی‌ماشین برای بررسی سرخ‌کردن عمیق و سرخ‌کردن با هوای داغ برای قارچ سرخ شده به ارزیابی دقیق‌تری از ویژگی‌های ظاهری و کیفیت نهایی غذا می‌پردازد. این رویکرد خودکار و جامع، قابلیت تحلیل عمیق‌تری نسبت به روش‌های سنتی ارزیابی دارد. با استفاده از سامانه‌های بینایی‌ماشین، می‌توان به طور همزمان داده‌های کیفی و کمی را جمع‌آوری و تحلیل نمود. این ویژگی این امکان را می‌دهد که بررسی دقیق‌تری در خصوص دو روش سرخ‌کردن عمیق و هوای داغ برای قارچ‌ها صورت پذیرد.

هدف از این تحقیق، استفاده از بینایی‌ماشین برای بررسی سرخ‌کردن قارچ با دو روش سرخ‌کردن عمیق و سرخ‌کردن با هوای داغ بوده است. نوآوری این پژوهش در تبدیل خواص کیفی سرخ‌کردن به مقادیر کمی و قابل اندازه‌گیری می‌باشد. با استفاده از پردازش تصویر و شناسایی نواحی رنگی قهوه‌ای، زرد و محاسبه پارامترهای آماری این نواحی و وزن دهی به این پارامترها، درصد سرخ شدن قارچ‌ها به شکل عددی محاسبه می‌شود. این رویکرد به مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد که کیفیت سرخ شدن را به گونه‌ای کمی و قابل مقایسه بیان نموده و در نتیجه انتخاب‌های بهتری در خصوص روش‌های سرخ‌کردن داشته باشند.

در نهایت، این تحقیق با ارائه نتایج حاصل از سرخ‌کردن قارچ در هر دو روش سرخ‌کردن عمیق و هوای داغ، به حل چالش و انتخاب بهتر بین هر دو روش سرخ‌کردن پرداخته است. در حالی که برخی از پژوهش‌ها به تأثیرات تغذیه‌ای روش‌های سرخ‌کردن پرداخته‌اند، این پژوهش به بررسی عمیق‌تر ارتباط بین کیفیت ظاهری و ارزش غذایی پرداخته است.

پیشینه پژوهش

در تحقیقی، برای ارزیابی کیفیت روغن‌های خوراکی، از تحلیل همبستگی و ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) استفاده شده است. این روش با دقت ۸۸٪ به تشخیص کیفیت روغن‌های خوراکی کمک می‌کند و به تولیدکنندگان امکان بهبود کیفیت محصولات را می‌دهد (Jia et al., 2019).

بسیاری از مطالعات به بررسی تأثیر روش‌های مختلف سرخ‌کردن بر روی کیفیت نهایی غذاها پرداخته‌اند. برای مثال، تحقیقی توسط Rabeler et al., 2018 انجام شده است که کیفیت سینه مرغ را تحت روش‌های مختلف سرخ‌کردن بررسی کرده و مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف ارائه داده است. این نوع تحقیقات به درک بهتری از اثرات هر روش بر روی کیفیت نهایی محصول، می‌کند.

برخی از تحقیقات به بررسی تأثیرات سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ بر روی محتوای چربی و کالری غذاها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، مقاله‌ای توسط (Liu et al., 2022) منتشر شده است که در آن مقایسه‌ای میان برخی محصولات غذایی با روش‌های سرخ کردن عمیق و هوای داغ صورت گرفته است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب روش سرخ کردن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی ارزش غذایی و سلامت غذا داشته باشد.

برخی از محققان به بررسی نوآوری‌ها در زمینه سرخ کردن و استفاده از دستگاه‌های جدید پرداخته‌اند. از جمله این تکنیک‌های نوآورانه در سرخ کردن، می‌توان به فناوری سرخ کردن با هوای داغ اشاره نمود (Salamatullah et al., 2021). این فناوری به دلیل قابلیت کاهش میزان روغن استفاده شده و همچنین حفظ کیفیت غذایی بیشتر، مورد توجه قرار گرفته است.

تحقیقات پیشین معمولاً به تأثیر روش‌های سرخ کردن بر روی طعم و بافت تمرکز داشته‌اند؛ علاوه بر آن، بسیاری از مطالعات موجود به ارزیابی‌های سنتی و دستی تکیه کرده‌اند و به فناوری‌های نوین در ارزیابی کیفیت غذا توجه کمتری داشته‌اند. (Rabeler et al., 2020). در این راستا، توسعه یک سامانه مبتنی بر بینایی ماشین می‌تواند به عنوان یک نوآوری در صنعت غذایی مطرح شود. این سامانه با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته پردازش تصویر، به تحلیل رنگ و بافت غذا پرداخته است و همچنین کیفیت سرخ شدن را به صورت کمی ارزیابی می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق ۳ کیلوگرم قارچ دکمه‌ای تازه، از شرکت دلسا البرز تهیه شد. برای ادامه روند آزمایش، قارچ‌ها وزن‌بندی و طبق فراوانی گروه‌بندی شدند. تعداد و وزن هر یک در هر گروه یادداشت شد و برای هر آزمایش، ۳ عدد قارچ طبق گروه‌بندی صورت گرفته بر اساس فراوانی در نظر گرفته شد. فراوانی تعداد قارچ‌ها، در وزن‌های تقریبی ۹، ۱۳ و ۱۷ گرم بود. طبق این وزن‌گیری، این سه وزن تقریبی ملاک گروه‌بندی در نظر گرفته شدند که هر گروه نسبت به گروه قبلی تقریباً ۴ گرم اختلاف وزنی داشت. برای نمایان بودن تغییرات ظاهری براساس متفاوت بودن وزن‌ها پس از سرخ شدن قارچ‌ها، در هر آزمایش یک قارچ از هر گروه انتخاب شد. اینکار باعث شد مجموع اختلاف وزنی کاهش یابد. (تعداد مورد آزمایش با توجه به تکرار برای هر دما ۱۲ عدد و جمعاً برای هر دو روش سرخ کردن ۷۲ عدد بوده است) پس از گروه‌بندی، هر کدام از گروه‌های دسته‌بندی شده به آرامی شسته شد. پس از شست‌شو، قارچ‌ها خشک شده و برای سرخ کردن آماده شدند. ۴ تکرار برای تحلیل و دریافت نتیجه بهتر در هر سطح دما و زمان در نظر گرفته شد. در شکل ۱ دسته‌بندی قارچ‌ها قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۱. قارچ‌های گروه‌بندی شده با توجه به وزن (از چپ به راست به ترتیب وزن ۹، ۱۳، ۱۷ گرم قابل مشاهده می‌باشد).

فرایند سرخ کردن هوای داغ

در این آزمایش برای قارچ‌ها با روش هوای داغ از سرخ‌کن هوای داغ استفاده شد. سرخ‌کن هوای داغ خانگی Tefal (مدل EY 801، ساخت کشور چین با توان مصرفی ۱۶۵۰ وات) برای سرخ کردن با هوای داغ در نظر گرفته شد. این سرخ‌کن در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲. سرخ کن هوای داغ تفال

فرایند سرخ کردن قارچ‌ها با روش هوای داغ در دماهای ۱۷۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و ۳ سطح زمانی ۱۰ و ۸ و ۶ دقیقه صورت گرفت (Basuny & Oatibi., 2016). این آزمایش‌ها با در نظر گرفتن چهار تکرار در هر دما و زمان، انجام شده است. برای پخش یکنواخت روغن در تمامی سطوح قارچ، قبل از سرخ کردن در روش هوای داغ، هر کدام از قارچ‌ها در ظرفی که محتوی روغن بوده غلتانده شد. این فرایند در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. پس از آن هر کدام از قارچ‌های گروه بندی شده، وزن می‌شوند. با کم کردن وزن ثانویه از وزن اولیه، میزان جذب روغن بدست می‌آید.



شکل ۳. قارچ آغشته شده در روغن به منظور سرخ کردن در دستگاه سرخ کن هوای داغ

فرایند سرخ کردن، پس از قرارگیری نمونه‌ها و تنظیم و دما و زمان با بستن درب سرخ کن شروع می‌شود. در سرخ کن هوای داغ از دمنده‌های هوا جهت تامین هوای مورد نیاز استفاده می‌شود.

فرایند سرخ کردن عمیق

فرایند سرخ کردن عمیق در داخل دستگاهی با گنجایش ۲ لیتر صورت گرفت. این نوع سرخ کن مجهز به المنتی جهت تامین دمای مورد نیاز برای سرخ کردن محصولات غذایی، دارای پنلی برای کنترل تنظیمات دمایی مورد نظر با توجه به نوع آزمایش می‌باشد. سرخ کن عمیق مورد استفاده در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴. نماهای گوناگون سرخ کن عمیق دو لیتری

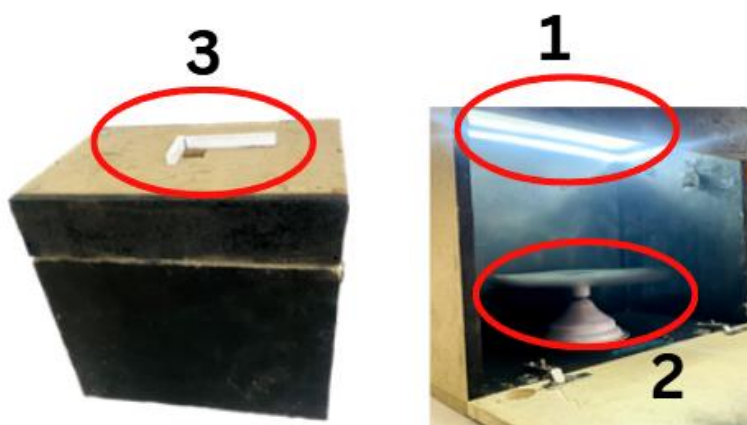
برای سرخ کردن قارچ‌ها، از دماهای ۱۷۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس، در ۳ سطح زمانی ۱، ۲ و ۳ (Li et al., 2019) استفاده شد. برای هر دما و زمان، ۴ تکرار در نظر گرفته شد. به منظور سرخ کردن قارچ‌ها، ظرف را به اندازه ۲ لیتر روغن پر شد. پس از رسیدن دمای روغن به دمای آزمایش، قارچ‌ها داخل ظرف پر از روغن دستگاه قرار گرفتند. پس از سرخ شدن در هر یک از سطوح دما و زمانی مورد نظر، وزن هر یک از آن‌ها یادداشت شد. نحوه قرارگیری قارچ‌ها در سرخ کن عمیق در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵. سرخ شدن محصول در سرخ کن عمیق (در هر آزمایش هر سه قارچ به صورت همزمان در داخل ظرف قرار گرفته است).

تجهیزات مورد استفاده در سامانه ماشین بینایی

برای تصویربرداری از قارچ‌های سرخ شده، جعبه‌ای به طول ۵۵ و عرض ۵۰ سانتی‌متر ساخته شد. قسمت فوقانی داخل جعبه، مجهز به نورپردازی است. جهت سهولت در پردازش تصاویر، صفحه‌ای با پس زمینه تیره، در نظر گرفته شد. محل قرارگیری دوربین در قسمت بیرونی، فوقانی جعبه بوده به گونه‌ای که بیشترین جزئیات حاصل گردد. قابی برای جلوگیری از تکان خوردن دوربین و ثابت بودن محل تصویربرداری برای دوربین در نظر گرفته شد. این سامانه در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. برای تصویربرداری از موبایل iPhone 12 pro استفاده شد. جهت اخذ تصاویر نمونه‌ها، تنظیمات ثابتی در نظر گرفته شد. تنظیمات نور و دوربین، جهت تصویربرداری با شرایط یکسان از تمامی نمونه‌ها، قبل از تصویربرداری صورت گرفت.

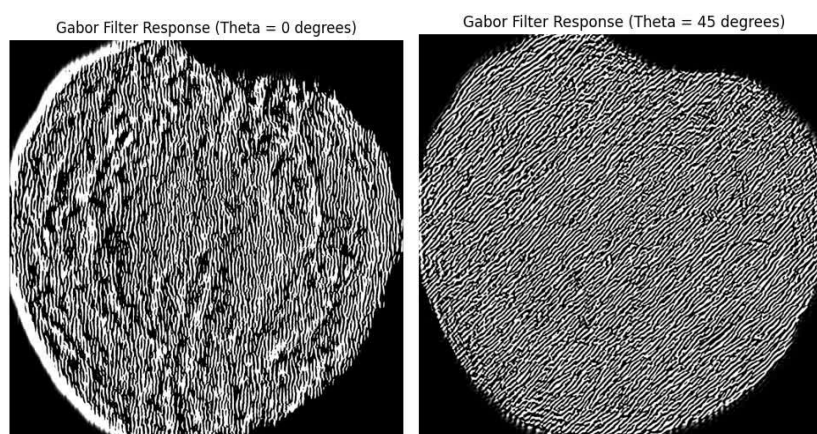


شکل ۶. دستگاه تصویربرداری از محصول شامل: (۱) نور پردازی، (۲) محل قرارگیری نمونه، (۳) محل قرارگیری موبایل

پیش پردازش تصویر

پیش‌پردازش مرحله‌ای است که در آن داده‌های اولیه (تصاویر) برای تحلیل‌های بعدی آماده می‌شوند. در قسمت اول ابتدا با استفاده از فیلتر گوسین به کاهش نویز در تصاویر پرداخته شده است. فیلتر گوسین با استفاده از یک هسته که به صورت گوسی شکل است، به نرم کردن

تصویر کمک می‌کند. این کار باعث می‌شود که جزئیات ناخواسته، نویز کاهش یابد و تصویر برای تحلیل‌های بعدی واضح‌تر باشد. پس از این مرحله لازم است تصاویر به فضای رنگی HSV^۱ تبدیل شوند. فضای رنگی HSV اجازه می‌دهد تا رنگ‌ها به راحتی شناسایی شوند. با توجه به موضوع تحقیق که در آن سرخ کردن محصول مطرح هست، این فضای رنگی برای شناسایی رنگ‌های خاص (مثل زرد و قهوه‌ای) مناسب‌تر بوده است. این تبدیل رنگی کمک می‌کند تا نواحی مورد نظر را با دقت بیشتری شناسایی نموده. در مرحله بعد، تصویر به فضای رنگی Lab تبدیل می‌شود. پس از آن کانال روشنایی (L) جدا شده و سپس با استفاده از CLAHE^۲ تباین و روشنایی تصویر بهبود داده می‌شود. این تکنیک به خصوص در تصاویر با نور ضعیف یا غیر یکنواخت مفید است و به بهتر شدن وضوح تصویر کمک می‌کند. در قسمت دوم، برای بالا بردن دقت فرایند، تصاویر رنگی را به تصاویر خاکستری تبدیل نموده و سپس برای بهبود تباین تصاویر از CLAHE استفاده شد. پس از آن با استفاده از فیلتر گابور بافت تصاویر بررسی شدند.



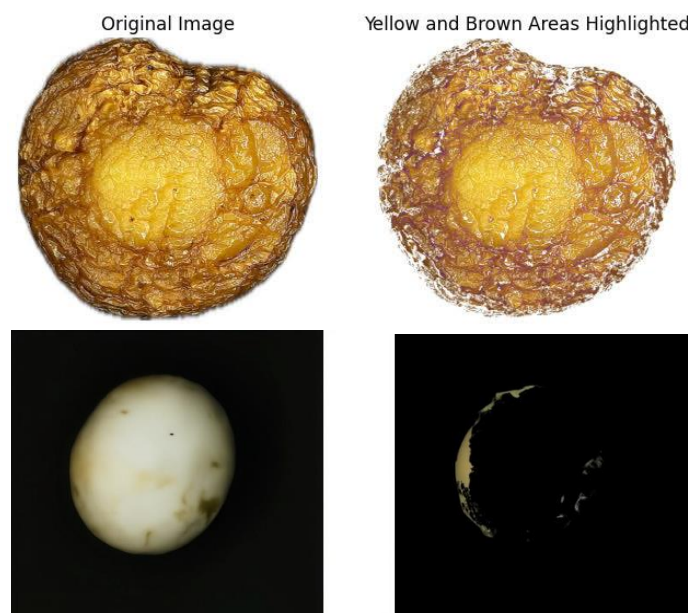
شکل ۷. پیش‌پردازش تصاویر و اعمال فیلتر گابور

در آنالیز بافت و آشکارسازی لبه، توابع گابور به طور وسیعی استفاده می‌شوند. فیلتر گابور یک فیلتر خطی و محلی است که هسته کانولوشن فیلتر گابور از حاصل ضرب یک تابع نمایی مختلط و گوسین بدست می‌آید. فیلترهای گابور در صورتی که به طور مناسب و دقیق تنظیم شوند، عملکرد بسیار مناسبی در تشخیص ویژگی‌های بافت و لبه بافت دارند. ویژگی دیگر فیلترهای گابور درجه تفکیک مشترک بالای آن‌ها بوده و این بدان معنی است که پاسخ آن‌ها هم در حوزه مکان و هم در حوزه فرکانس کاملاً محلی و قابل تنظیم کردن می‌باشد. نمونه فیلتر گابور اعمال شده بر روی تصاویر در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.

تحلیل تصویر^۳

تحلیل تصویر شامل شناسایی ویژگی‌های خاص در تصویر بوده، با توجه به موضوع تحقیق، به شناسایی نواحی زرد و قهوه‌ای محدود می‌شود. طبق بررسی‌های صورت گرفته سرخ شدن قارچ‌ها، رنگ‌هایی مایل به رنگ زرد نمایانگر کمترین میزان سرخ شدن محصول و رنگ قهوه‌ای نمایانگر بیشترین میزان سرخ شدن محصول می‌باشد. در تحلیل اول با استفاده از فضای رنگی HSV^۱، پیکسل‌های زرد با توجه به تعداد هر عکس، به صورت جداگانه شمارش شده و برای بدست آوردن میانگین پیکسل زرد در آن تصویر بر تعداد کل پیکسل‌های تصویر تقسیم شدند. برای نمایش نتیجه به درصد، عدد بدست آمده را در عدد ۱۰۰ ضرب نموده، پس از آن تمامی درصد‌های بدست آمده جمع شده و بر تعداد کل عکس‌ها تقسیم شدند. این گونه میانگین بیانگر درصد کل نواحی زرد به صورت کمی بوده است. برای شناسایی رنگ قهوه‌ای، مشابه روش شناسایی رنگ زرد، عمل شد. این مرحله کمک می‌کند تا اطلاعات مربوط به رنگ‌ها و ویژگی‌های سطح تصویر استخراج شوند.

1. Hue, Saturation, Value
2. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
3. Image Analysis



شکل ۸. پیش پردازش تصاویر برای تشخیص رنگ قهوه‌ای و زرد

پس از پیش پردازش برای تحلیل داده‌ها از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. این تحلیل یک تکنیک کاهش ابعاد می‌باشد. این تحلیل کمک می‌کند تا داده‌ها به فضای کم‌بعدتری منتقل شوند. در این تحلیل بیشترین واریانس داده‌ها حفظ می‌شود. این روش می‌تواند به کاهش زمان محاسباتی و بهبود عملکرد پردازش تصاویر کمک کند.

تحلیل تفکیک خطی (LDA) برای پیدا کردن ترکیب خطی از ویژگی‌ها، بیشترین تفکیک را بین دو کلاس (روش‌های سرخ‌کردن) ایجاد می‌کند. این الگوریتم میانگین ویژگی‌های هر کلاس را محاسبه کرده و تفکیک را بر اساس واریانس‌های بین کلاسی و درون کلاسی انجام می‌دهد.

پس از کاهش داده‌ها می‌توان از روش تحلیل ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده نمود. این روش ویژگی‌های بین تصاویر هر دو روش سرخ‌کردن را یاد می‌گیرد. پس از آموزش مدل، می‌توان از آن برای پیش‌بینی دسته‌بندی تصاویر جدید استفاده نمود.

ارزیابی

برای ارزیابی مدل، از شاخص‌های دقت، صحت، بازیابی^۳ و امتیاز^۴ F_1 استفاده شده است که روابط آن در زیر آمده است:

پاسخ‌های مثبت درست (True Positives | TP): «نمونه‌هایی که مثبت پیش‌بینی شده و در حقیقت نیز مثبت هستند.»

پاسخ‌های مثبت نادرست (False Positives | FP): «نمونه‌هایی که مثبت پیش‌بینی شده اما در حقیقت منفی هستند.»

پاسخ‌های منفی درست (True Negatives | TN): «نمونه‌هایی که منفی پیش‌بینی شده و در حقیقت نیز منفی هستند.»

پاسخ‌های منفی نادرست (False Negatives | FN): «نمونه‌هایی که منفی پیش‌بینی شده اما در حقیقت مثبت هستند.»

دقت: دقت نشان‌دهنده درصد کل پیش‌بینی‌های درست مدل نسبت به همه پیش‌بینی‌ها می‌باشد. این معیار تمامی نمونه‌های صحیح پیش‌بینی شده (چه مثبت و چه منفی) را در مقایسه با مجموع کل نمونه‌ها محاسبه می‌کند. با استفاده از رابطه ۱ میزان دقت بدست می‌آید.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \quad (\text{رابطه ۱})$$

صحت: نشان‌دهنده نسبت پیش‌بینی‌های درست از کلاس مثبت به کل پیش‌بینی‌های انجام‌شده برای این کلاس است. رابطه ۲

را می‌توان برای آن در نظر گرفت و این معیار نشان می‌دهد که از بین تمامی نمونه‌هایی که به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند، چه تعداد به‌درستی مثبت بوده‌اند.



$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad \text{رابطه ۲}$$

حساسیت یا بازیابی: نشان‌دهنده نسبت پیش‌بینی‌های درست از کلاس مثبت به کل نمونه‌های واقعی مثبت است. این معیار میزان توانایی مدل در شناسایی نمونه‌های مثبت واقعی را نشان می‌دهد که رابطه ۳ می‌توان برای آن در نظر گرفت.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad \text{رابطه ۳}$$

امتیاز F1: معیاری ترکیبی است که صحت و حساسیت را با هم ترکیب می‌کند. این معیار به‌ویژه زمانی مفید است که توزیع کلاس‌ها نامتعادل باشد. F1 نشان‌دهنده تعادلی بین Precision و Recall بوده و برای سنجش کلی عملکرد مدل به کار می‌رود. رابطه ۴ را می‌توان برای آن در نظر گرفت:

$$F_1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad \text{رابطه ۴}$$

این معیار، میانگین هماهنگ Precision و Recall را محاسبه می‌کند تا مدل‌هایی که هر دو معیار در آن‌ها مهم است، بهتر ارزیابی شوند.

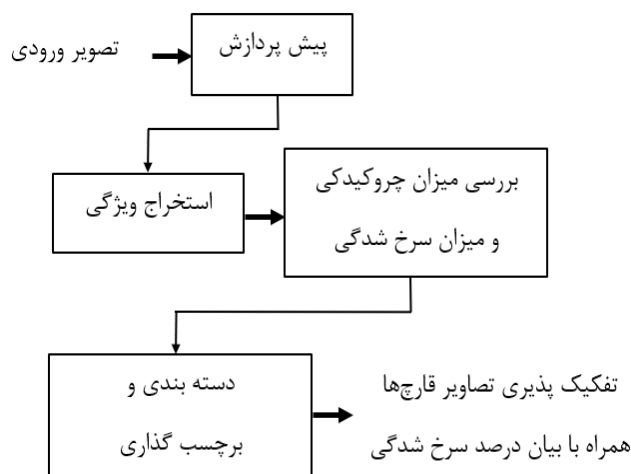
یافته‌های پژوهش

تحلیل رنگ قارچ

این سامانه قادر است با استفاده از تبدیل تصاویر به فضای رنگی HSV، نواحی رنگی زرد و قهوه‌ای را شناسایی کند. این رنگ‌ها نمایانگر کیفیت سرخ شدن در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از آستانه‌گذاری، درصد نواحی زرد و قهوه‌ای نسبت به کل پیکسل‌ها محاسبه می‌شود. این تحلیل این امکان را می‌دهد که تغییرات کیفی در ظاهر غذا را به‌طور دقیق‌تری بررسی شود و ارتباط آن‌ها با کیفیت سرخ شدن مورد بررسی قرار گیرد.

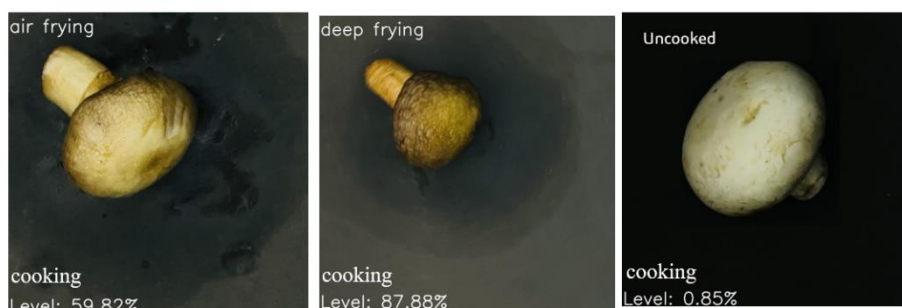
تحلیل بافت قارچ

علاوه بر تحلیل رنگ، این سامانه به بررسی بافت غذا نیز می‌پردازد. با استفاده از فیلترهای گابور، ویژگی‌های بافتی قارچ‌ها استخراج می‌شود. این ویژگی‌ها کمک می‌کنند تا ساختار و کیفیت ظاهری محصول را به‌دقت ارزیابی شود. همچنین، با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، میزان چروکیدگی قارچ‌ها نیز محاسبه می‌شود. این روند می‌تواند به عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت سرخ شدن در نظر گرفته شود. این رویکرد جامع و خودکار این امکان را می‌دهد که به‌طور همزمان داده‌های کیفی و کمی را جمع‌آوری و تحلیل شوند. مراحل پردازش تصاویر در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.



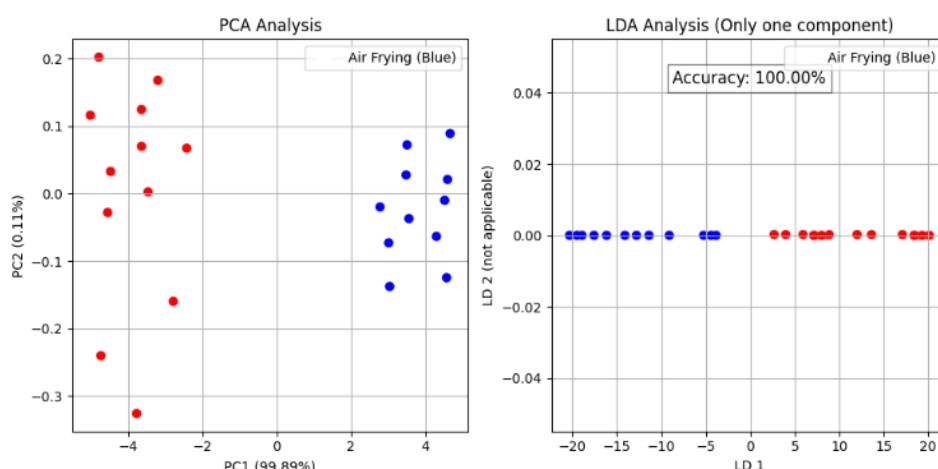
شکل ۹. روش پیشنهادی برای تفکیک پذیری تصاویر قارچ‌های سرخ شده

با توجه به پیش پردازش صورت گرفته بر روی تصاویر قارچ‌ها، برای شناسایی آن‌ها بر اساس رنگ و میزان چروکیدگی قابل مشاهده بوده است. همچنین دسته بندی و برچسب گذاری بر اساس روش سرخ شدن و یا خامی قارچ‌ها و درصد سرخ شدن، پس از کد نویسی در خروجی تصاویر درج شده است. این تفکیک پذیری در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰. تصاویر شناسایی شده و طبقه بندی شده با توجه به تفاوت رنگی و میزان چروکیدگی و نمایش درصد سرخ شدگی قارچ‌ها به ترتیب از راست به چپ از سه قارچ خام، سرخ شده به صورت عمیق و هوای داغ

در مرحله بعد، کلاس بندی تصاویر به مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی صورت گرفت. داده‌ها به دو بخش تقسیم شدند، یک بخش برای آموزش مدل و یک بخش برای آزمون مدل در نظر گرفته شد. برای تحلیل داده‌های حاصل از پردازش تصاویر، سه تحلیل PCA، LDA و SVM انجام شد.

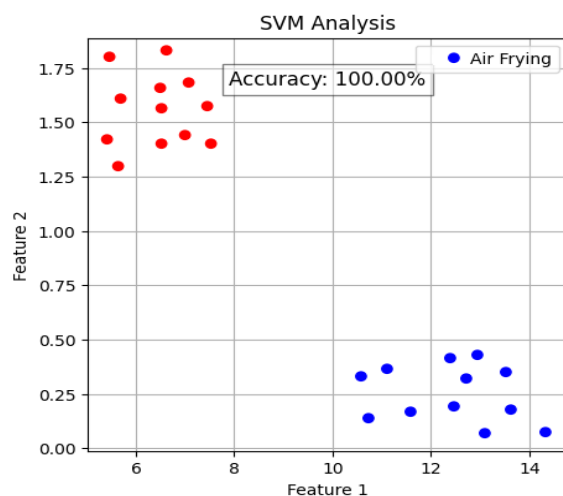


شکل ۱۱. نمودار PCA و LDA ترسیم شده برای نمونه‌های سرخ شده به صورت عمیق و هوای داغ در محیط Google Colab (رنگ آبی هوای داغ رنگ قرمز عمیق)

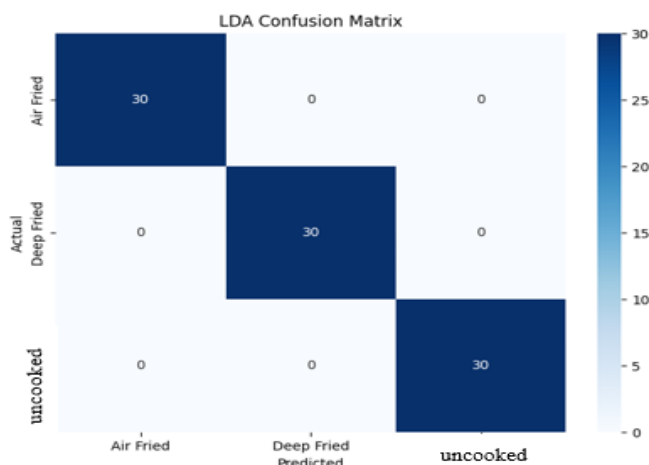
در شکل ۱۱ تحلیل تفکیک خطی با دقت ۱۰۰٪ داده‌ها را تفکیک نموده و تحلیل مولفه‌های اصلی دو مولفه اصلی PC-1 و PC-2 به ترتیب ۹۹٫۸۹٪ و ۰٫۱۱٪ از واریانس داده‌ها را توانسته‌اند توضیح دهند. در شکل ۱۲ نمودار ماشین بردار پشتیبان (SVM) دو کلاس مختلف از داده‌های یک سامانه ماشین بینایی را نشان می‌دهد. هر کلاس با یک نماد متفاوت (دایره آبی، دایره قرمز) مشخص شده است. نمودار نشان می‌دهد که SVM موفق شده است با دقت ۱۰۰٪ جداسازی هر کلاس را انجام دهد.

شکل ۱۳، ۱۴ نمایانگر دسته بندی تصاویر بر اساس ماتریس اغتشاش جهت ارزیابی عملکرد روش‌های استفاده شده در تحلیل بافت و رنگ صورت گرفته بر روی تحلیل‌های ماشین بینایی بوده است. ماتریس اغتشاش در این تصاویر سه دسته را شامل می‌شود از جمله: خام، هوای داغ و عمیق. محور عمودی نشان‌دهنده برچسب‌های واقعی و محور افقی نشان‌دهنده برچسب‌های پیش‌بینی شده است. تعداد

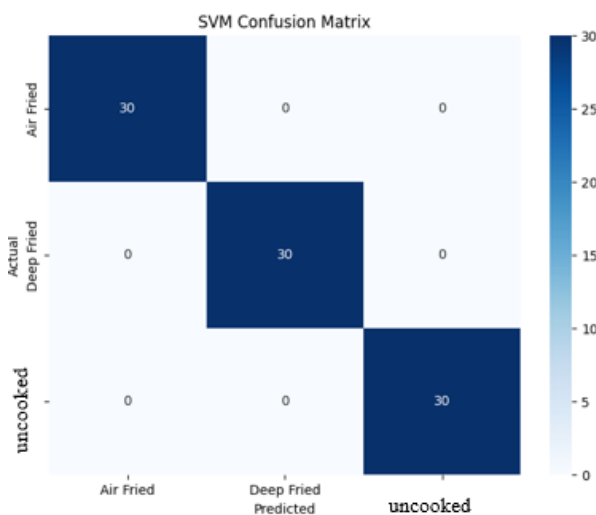
۹۰ عکس از هر گروه قارچ (خام، عمیق، هوای داغ) به صورت اتفاقی در نظر گرفته شده است. این نتایج بیانگر تشخیص دقیق دسته‌ها، بدون قرارگیری نادرست در سایر دسته‌ها بوده است.



شکل ۱۲. تحلیل SVM ترسیم شده در Google Colab (رنگ آبی هوای داغ رنگ قرمز عمیق)



شکل ۱۳. ماتریس اغتشاش تحلیل LDA



شکل ۱۴. ماتریس اغتشاش تحلیل SVM

در شکل ۱۵ میزان بازیابی، صحت و امتیاز F_1 و دقت قابل مشاهده می‌باشد.

	precision	recall	f1-score	support
Air Fried	1.00	1.00	1.00	30
Deep Fried	1.00	1.00	1.00	30
uncooked	00	1.00	1.00	30
accuracy			1.00	90
macro avg	1.00	1.00	1.00	90
weighted avg	1.00	1.00	1.00	90

شکل ۱۵. نشان دهنده بازیابی، صحت، امتیاز F_1 و دقت

بحث و نتیجه گیری

تحقیقات موجود اکثراً به صورت تئوری و یا در مقیاس‌های کوچک انجام شده و کمتر به کاربردهای صنعتی و تجاری توجه شده است. این تحقیق و گسترش مطالعات در این حوزه می‌تواند به توسعه یک سامانه کاربردی جهت ایجاد ابزاری استاندارد برای صنعت غذایی منجر شود و به تولیدکنندگان کمک کند تا کیفیت محصولات سرخ شده خود را بهبود بخشند. همچنین، به کارگیری این سامانه و گسترش تحقیقات در این حوزه می‌تواند به ایجاد استانداردهای جدیدی برای ارزیابی کیفیت غذاهای سرخ شده منجر شود و در نهایت، بهبود کیفیت و ایمنی محصولات غذایی را به ارمغان آورد. استفاده از روش‌های نوین مانند سامانه‌های بینایی ماشین، جذابیت خاصی برای مصرف‌کنندگان دارد. مصرف‌کنندگان همواره به دنبال محصولات سرخ شده‌ای هستند که بافت و ظاهر مناسب را دارا بوده و از نظر طعم و بو نیز مورد قبول باشد. در سرخ کردن قارچ با استفاده از هوای داغ، قارچ‌ها به دلیل از دست دادن میزان آب کمتر نسبت به قارچ‌های سرخ شده به روش عمیق، دارای بافت منسجم‌تری بودند. در روش سرخ کردن عمیق، بافت قارچ‌ها دارای چروکیدگی‌های بیشتری بود و از نظر رنگی، سرخ کردن به روش عمیق موجب تیره شدن رنگ قارچ‌ها به سمت رنگ زرد تیره و قهوه‌ای شد. در مقابل، قارچ‌های سرخ شده با روش هوای داغ، رنگی مایل به زرد داشتند و از نظر ظاهری، میزان جذب روغن در قارچ‌های سرخ شده به روش عمیق زیاد بود، به گونه‌ای که این میزان روغن در هنگام مصرف برای سلامتی مصرف‌کنندگان مضر بوده و در طعم قارچ تأثیر بسزایی دارد. یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق، توانایی تشخیص کمی میزان پختگی قارچ‌ها با استفاده از تحلیل‌های رنگ و بافت است. این سامانه با شناسایی نواحی قهوه‌ای و زرد در تصاویر و محاسبه پارامترهای آماری و وزن دهی به آن‌ها، با محاسبات در مدل ریاضی، درصد سرخ شدن را به صورت عددی محاسبه می‌کند. این ویژگی امکان مقایسه دقیق‌تری بین کیفیت سرخ شدن روش‌های مختلف را فراهم می‌آورد. به طور کلی، این پژوهش اثربخشی بالایی استفاده از سامانه بینایی ماشین را در تشخیص تفاوت‌های میان دو روش سرخ کردن عمیق و هوای داغ نشان داده و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای توسعه سامانه‌های هوشمند در تشخیص میزان سرخ شدن و بهبود فرآیندهای ارزیابی کیفی محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، این نتایج می‌تواند با استفاده از فناوری‌های نوین و اتوماسیون فرآیندهای ارزیابی کیفیت، به بهبود کیفیت غذاهای سرخ شده و انتخاب‌های بهتری برای مصرف‌کنندگان کمک نموده و در نهایت، به ارتقاء سلامت و رضایت مصرف‌کنندگان منجر شود.

REFERENCES

- Abd Rahman, N. A., Abdul Razak, S. Z., Lokmanalhakim, L. A., Taip, F. S., & Mustapa Kamal, S. M. (2016). Response surface optimization for hot air-frying technique and its effects on the quality of sweet potato snack. *Journal of Food Process Engineering*, 40(4). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12507>
- Anonymous. (2023). Global air fryer market, dynamics, trends, and market analysis. Retrieved February 12, 2023, from <https://www.stratviewresearch.com/1864/air-fryer-market.html>
- Basuny, A.M.M., & Oatibi, H.H.A. (2016). Effect of a novel technology (air and vacuum frying) on sensory evaluation and acrylamide generation in fried potato chips. *Banat's J. Biotechnol.* 7(14), 101–112. [https://doi.org/10.7904/2068-4738-vii\(14\)-101](https://doi.org/10.7904/2068-4738-vii(14)-101)
- Huang, L., Zhao, J., Chen, Q., & Zhang, Y. (2014). Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision, and electronic nose techniques. *Food Chemistry*, 145, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.073>
- Jia, W., Liang, G., Jiang, Z., & Wang, J. (2019). Advances in electronic nose development for application to



- agricultural products. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2226–2240. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01552-1>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F.X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Comput. Electron. Agric.* 2018, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Li, X., Wu, G., Yang, F., Meng, L., Huang, J., Zhang, H., Jin, Q., & Wang, X. (2019). Influence of fried food and oil type on the distribution of polar compounds in discarded oil during restaurant deep frying. *Food Chemistry*, 272, 12–7. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.023.
- Liu, L., Huang, P., Xie, W., Wang, J., Li, Y., Wang, H., Xu, H., Bai, F., Zhou, X., Gao, R., & Zhao, Y. (2022). Effect of air fryer frying temperature on the quality attributes of sturgeon steak and comparison of its performance with traditional deep fat frying. *Food Science & Nutrition*, 10, 342–353. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2472>
- Michalak-Majewska, M., Stanikowski, P., Gustaw, W., Sławińska, A., Radzki, W., Skrzypczak, K., & Jabłońska-Ryś, E. (2018). Sous-vide cooking technology—Innovative heat treatment method of food. *Food Science, Technology and Quality*, 25, 34-44. <https://doi.org/10.15193/ZNTJ/2018/116/244>
- Rabeler, F., & Feyissa, A. H. (2018). Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. *Journal of Food Engineering*, 237, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021>
- Salamatullah, A. M., Ahmed, M. A., Alkaltham, M. S., Hayat, K., Aloumi, N. S., AlDossari, A. M., Al-Harbi, L. N., & Arzoo, S. (2021). Effect of air-frying on the bioactive properties of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Processes*, 9(3), 435–446. <https://doi.org/10.3390/pr9030435>