



Research Paper

Feasibility of combining hyperspectral imaging with an artificial neural network to detect pistachio powder adulteration

Reza Mohammadigol¹, Majid Lashgari^{1*}

¹: Department of Biosystems Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Article History

Submitted: 2026/05/07

Revised: 2026/06/17

Accepted: 2026/06/23

Published online: 2026/06/30

Keywords:

Food adulteration, broad bean powder, non-destructive evaluation, hyperspectral imaging.

Abstract

Pistachio, as one of the world's most valuable nuts, has always been a target of economic fraud. Pistachio powder, due to its widespread application in the food industry, is highly susceptible to adulteration with cheaper powders. The aim of this study was to develop a rapid, non-destructive, and accurate method based on a combination of hyperspectral imaging and an artificial neural network to detect adulteration of pistachio powder with faba bean powder. Pure pistachio powder and mixtures with 25 and 50% faba bean powder (w/w) were prepared. Hyperspectral images of the samples were acquired over 400–1000 nm using a hyperspectral imaging system, and the average reflectance spectrum for each sample was extracted. A multilayer perceptron neural network with one hidden layer was designed and trained. The model's performance was evaluated on a test set consisting of 30% of the data. The results showed that the combined method of hyperspectral imaging and an artificial neural network could detect non-destructively and rapidly the adulteration of pistachio powder with broad bean powder, with an accuracy of 94.59%. This method holds great potential for application in production lines, quality control laboratories, and regulatory organizations to preserve the authenticity of pistachio products and protect consumer rights.

*Corresponding author email:

m-lashgari@araku.ac.ir

ORCID: 
0000-0002-9637-1601



How to cite this paper:

Mohammadigol, R., and Lashgari, M. (2026). Feasibility of combining hyperspectral imaging with an artificial neural network to detect pistachio powder adulteration. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 38: 119-130. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15023.770> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by Shahrekord University. 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.2026.15023.770>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Pistachio (*Pistacia vera* L.) is one of the world's most valuable nuts, rich in unsaturated fatty acids, high-quality proteins, phenolics, vitamins, and minerals. In 2022, Iran was the second-largest producer after the USA, and Turkey was in third place after Iran. Due to its high economic value and growing demand, pistachio powder is highly susceptible to adulteration, including mixing with cheaper powders and adding artificial colorants. Such fraud harms consumer rights and can pose health risks, particularly for individuals with allergies or favism.

Among various adulterants, faba bean (*Vicia faba*) powder is commonly used due to its low cost, similar color and texture, lack of strong taste or odor, and easy mixability. Traditional methods, such as sensory evaluation and simple chemical tests, cannot reliably detect this adulteration. Destructive techniques like chromatography and mass spectrometry are accurate but time-consuming, expensive, and unsuitable for rapid screening.

Recently, non-destructive methods have gained attention. Research on pistachio adulteration has focused on near-infrared, mid-infrared, and Raman spectroscopy, as well as image processing and deep learning. Hyperspectral imaging, which combines spectral and spatial information, has been successfully used to assess pistachio kernel quality, moisture content, aflatoxin, and fungal contamination. However, its application for detecting faba bean adulteration in pistachio powder has not been systematically reported. Given the complexity of hyperspectral data, artificial neural networks are ideal for pattern recognition and accurate adulteration detection.

This study aims to develop a rapid, non-destructive, and accurate method based on hyperspectral imaging combined with an artificial neural network to detect the levels of adulteration in pistachio powder with faba bean powder.

Material and Methods

Pistachio kernels (cv. Ahmad Aghaei) and faba beans were purchased from a local market. One day before the experiments, raw samples were separately milled, sieved through a 30-mesh (600 μm) sieve to achieve uniform particle size, and stored in nylon bags at room temperature. Adulterated samples were prepared by mixing faba bean powder with pure pistachio powder at 0% (pure), 25%, and 50% weight ratios. For each adulteration level, 40 samples (total of 120) were prepared. Approximately 6.5 g of each sample was placed in a wooden cup, and the surface was flattened to reduce shadow effects.

A VA1000 hyperspectral imaging system (NIT Optics) with a spectral range of 400–1000 nm was used. Reflectance calibration was performed using white and dark references. Min-Max normalization was applied for standardization. Principal Component Analysis was used for dimensionality reduction. A multilayer perceptron neural network with one hidden layer was trained using 70% of the data and tested on 30%, using IBM Modeler v.18.

Results and Discussion

After observing the spectra, the initial and final wavelengths were removed due to high noise, and the spectral region from 450 to 1000 nm was analyzed. To examine differences among sample spectra, their mean spectra were plotted.

In principal component analysis, new variables are created, each being a linear combination of the original variables. These principal components retain the maximum information from the original variable matrix. The first principal component contains the largest variance, the second captures information not explained by the first, and so on. PCA performed in IBM Modeler ranked all principal components by importance. In this study, only PC1, PC2, PC4, and PC5 were identified as important. The distribution of samples in the coordinate system of the first three principal components showed good separation between classes, which is

promising for achieving a high-accuracy classification model.

The software selected a three-layer perceptron neural network with one hidden layer containing three neurons. The input layer had four neurons (corresponding to the four principal components), and the output layer had three neurons for classification into classes A, B, and C. The confusion matrix showed accuracies of 98.80% for training and 94.59% for testing. Errors occurred only for class C, while classes A and B achieved 100% accuracy. Thus, the combination of hyperspectral imaging and an artificial neural network successfully distinguished the three classes, with perfect detection of pure pistachio powder.

Unlike previous studies that used adulterants such as green peas or spinach, this study uniquely employed faba bean powder—an inexpensive and common product in Iran. Hyperspectral imaging enables detailed characterization of pistachio biochemical components, including proteins, carbohydrates, minerals, fatty acids, and phenolic compounds. However, overlapping spectral features of pistachio and faba bean make interpretation challenging.

Conclusions

In this study, a novel, rapid, and non-destructive method based on hyperspectral imaging (400–1000 nm) combined with a multilayer perceptron artificial neural network was developed to detect adulteration of pistachio powder with faba bean powder. The results showed that the proposed method can distinguish pure samples from adulterated ones (25% and 50% faba bean powder) with excellent accuracy. Due to its non-destructive nature and high speed, this approach has significant practical potential for integration into food production lines, quality control

laboratories, and inspection systems. Overall, the combination of hyperspectral imaging and neural networks can serve as an effective and reliable tool to preserve pistachio authenticity, prevent economic fraud, and protect consumer rights.

Future research should focus on evaluating the method's performance for detecting other adulterants, expanding the model with larger datasets that include lower adulteration levels (e.g., 5%, 10%, and 15%) and, as a next step, validating the approach on real production lines.

Author Contributions

The authors' participation in this research is as follows:

First author: Spectral data acquisition, data mining, text review, and editing.

Second author: Samples preparation, spectral data acquisition, data preparation, writing the initial draft.

Data Availability Statement

All relevant data and results are reported within the manuscript in the form of tables and figures.

Ethical Considerations

The authors confirm that ethical principles have been observed in conducting and publishing this research.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

The authors received no specific funding for this research.



امکان‌سنجی ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص تقلب پودر پسته

رضا محمدی گل^۱ و مجید لشگری^{*۱}

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده	تاریخچه مقاله	
<p>پسته به‌عنوان یکی از ارزشمندترین خشکبار جهان، همواره در معرض تقلب‌های اقتصادی قرار دارد. پودر پسته به دلیل کاربرد گسترده در صنایع غذایی، به‌شدت در معرض اختلاط با پودرهای ارزان‌قیمت است. هدف این پژوهش، توسعه یک روش سریع، غیرمخرب و دقیق مبتنی بر ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور تشخیص تقلب پودر پسته با پودر باقلا بود. نمونه‌های پودر پسته خالص و مخلوط با درصد‌های مختلف پودر باقلا (۰، ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی) تهیه شدند. تصاویر فراطیفی نمونه‌ها در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر توسط یک سامانه تصویربرداری فراطیفی ثبت شد و میانگین طیف بازتابی هر نمونه استخراج شد. یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با یک لایه پنهان طراحی و آموزش داده شد. عملکرد مدل بر روی مجموعه‌آزمون که متشکل از ۳۰ درصد داده‌ها بود مقایسه گردید. نتایج نشان داد روش ترکیبی تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی قادر است با صحت ۹۴/۵۹ درصد، تقلب پودر پسته با پودر باقلا را به‌صورت غیرمخرب و سریع تشخیص دهد. این روش پتانسیل بالایی برای کاربرد در خطوط تولید، آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت و سازمان‌های نظارتی به‌منظور حفظ اصالت محصولات پسته و حمایت از حقوق مصرف‌کننده دارد.</p>	<p>دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷</p> <p>بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷</p> <p>پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲</p> <p>انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹</p>	
	<p>واژه‌های کلیدی:</p> <p>تقلب مواد غذایی، پودر باقلا، ارزیابی غیرمخرب، تصویربرداری فراطیفی.</p>	
	<p>*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m-lashgari@araku.ac.ir</p>	
	<p>ORCID:  ۱۶۰۱-۹۶۳۷-۰۰۰۲-۰۰۰۰</p>	



نحوه استناد به این مقاله:

محمدی گل، ر. و لشگری، م. (۱۴۰۵). امکان‌سنجی ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص تقلب پودر پسته. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۸: ۱۱۹-۱۳۰. شناسه دیجیتال:

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15023.770>

مقدمه

پسته با نام علمی *Pistacia vera L.* یکی از باارزش‌ترین خشکبار جهان است که به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب غیراشباع، پروتئین‌های با کیفیت، ترکیبات فنولی، برخی ویتامین‌ها و مواد معدنی، جایگاه ویژه‌ای در رژیم غذایی و صنایع فراوری دارد. در سال ۲۰۲۲ میلادی، ایران پس از آمریکا، دومین تولیدکننده بزرگ پسته در جهان بوده و ترکیه نیز پس از ایران در جایگاه سوم قرار داشته است (Khadivi, 2025). ارزش اقتصادی بالا و تقاضای روبه‌رشد در بازارهای هدف، فرآورده‌های پسته، به‌ویژه پودر پسته را به یکی از آسیب‌پذیرترین محصولات از نظر وقوع تقلب تبدیل کرده است.

پودر پسته به دلیل کاربرد گسترده در صنایع شیرینی‌پزی، شکلات‌سازی، بستنی و فرآورده‌های نانوبی، همواره در معرض خطراتی نظیر استفاده از پسته‌های بی‌کیفیت یا کهنه، اختلاط با پودرهای ارزان‌تر و افزودن رنگ‌های مصنوعی قرار دارد. این اقدامات نه‌تنها حقوق اقتصادی مصرف‌کننده را نقض می‌کند، بلکه برخی از آنها می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت عمومی از جمله بروز حساسیت‌های ناخواسته در افراد آلرژیک به سایر مواد را به همراه داشته باشد.

از میان انواع تقلب، اختلاط پودر پسته با پودر حبوبات ارزان‌قیمت مانند باقالی یا باقلا با نام علمی *Vicia faba* به دلیل شباهت نسبی در رنگ، بافت و عدم وجود بوی قوی در پودر باقلا، یکی از رایج‌ترین و درعین حال چالش‌برانگیزترین موارد محسوب می‌شود. پودر باقلا به دلیل هزینه پایین تولید و دسترسی آسان می‌تواند بدون ایجاد تغییر محسوس در ظاهر اولیه، جایگزین بخشی از پودر پسته شود. این نوع تقلب نه‌تنها خسارت اقتصادی مستقیم به مصرف‌کننده وارد می‌کند، بلکه می‌تواند برای برخی افراد، به‌ویژه مبتلایان به فاویسم (Favism)، خطرآفرین باشد. فاویسم یک بیماری حساسیتی است و مصرف باقلا و ترکیبات مشابه آن می‌تواند باعث کم‌خونی در افراد مستعد این بیماری شود. علاوه بر هزینه بسیار پایین پودر باقلا که حدود یک‌پنجم تا یک‌هشتم پودر پسته مرغوب است، شباهت رنگ، شباهت بافت، عدم وجود طعم و بوی غالب، قابلیت جذب رنگ و طعم‌دهنده‌ها و قابلیت اختلاط همگن با پودر پسته، می‌تواند بدون ایجاد تغییر محسوس در ظاهر اولیه، جایگزین بخشی از پودر پسته شود و به‌این‌ترتیب انگیزه اقتصادی قوی برای تولیدکنندگان متقلب ایجاد می‌کند.

تشخیص این نوع تقلب با روش‌های سنتی مانند ارزیابی حسی (چشایی، بویایی و لامسه) یا آزمایش‌های شیمیایی ساده، به دلیل شباهت فیزیکی بین دو پودر، معمولاً با دقت کافی امکان‌پذیر نیست. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های مخرب همچون کروماتوگرافی، طیف‌سنجی جرمی و روش‌های مولکولی برای شناسایی تقلب در مواد غذایی توسعه یافته‌اند. اما این روش‌ها اغلب زمان‌بر، پرهزینه، نیازمند آماده‌سازی پیچیده و تخریب نمونه هستند و برای غربالگری سریع و گسترده در خطوط تولید یا نظارت میدانی مناسب نمی‌باشند. بنابراین طی سالیان اخیر، توجه به روش‌های غیرمخرب برای تشخیص تقلب در انواع مواد غذایی کاملاً چشمگیر بوده است. مروری بر منابع حاکی از آن است که در خصوص روش‌های غیرمخرب تشخیص تقلب پسته، تحقیقات اخیر بیشتر متمرکز بر طیف‌سنجی فرورسرخ نزدیک و میانی (Genis et al., 2021; Temizkan et al., 2020) و پردازش تصویر و یادگیری عمیق (Çınar et al., 2024; Doğan et al., 2023) بوده است.

یکی از روش‌های غیرمخرب برای تشخیص تقلب در انواع پودرهای مواد غذایی که همچنان موردتوجه محققین قرار دارد روش تصویربرداری فراطیفی است (He et al., 2023; Park et al., 2023; Nargesi et al., 2024; Faqeerzada et al., 2020; Aqeel et al., 2025). تصویربرداری فراطیفی به‌عنوان یک فناوری پیشرفته و غیرمخرب، قدرت طیف‌سنجی و تصویربرداری را در یک سامانه ترکیب می‌کند. در واقع، امکان ترکیب اطلاعات طیفی و مکانی را به طور هم‌زمان فراهم می‌کند و پتانسیل بالایی برای شناسایی ترکیبات ناخالصی در پودرهای غذایی دارد. بر خلاف دوربین‌های معمولی که تنها سه باند طیفی قرمز، سبز و آبی را ثبت می‌کنند، یک دوربین فراطیفی قادر است صدها باند طیفی پیوسته و مجاور (معمولاً در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر برای محدوده مرئی تا فرورسرخ نزدیک) را برای هر پیکسل از تصویر ثبت نماید. خروجی این سامانه یک ابرمکعب داده (Hypercube) با ابعاد (x, y, λ) است که در آن x و y مختصات مکانی و λ طول موج می‌باشد. اگرچه استفاده از روش تصویربرداری فراطیفی در تشخیص تقلب پودر پسته در مرور منابع یافت نشد؛ اما این روش برای تشخیص سایر ویژگی‌های پسته از جمله کیفیت مغز پسته (Martínez-Peña et al., 2026)، محتوای رطوبت مغز پسته (Mohammadi-Moghaddam et al., 2018)، میزان

رقمی آزمایشگاهی بادقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. نسبت‌های تقلب بر اساس بررسی‌های میدانی و پیشینه پژوهش به صورت زیر انتخاب شدند:

رده A: پودر پسته خالص

رده B: اختلاط پودر پسته خالص و پودر باقلا به نسبت ۷۵

به ۲۵ درصد وزنی

رده C: اختلاط پودر پسته خالص و پودر باقلا به نسبت ۵۰

به ۵۰ درصد وزنی

برای هر سطح تقلب، ۴۰ نمونه تهیه شد که در مجموع ۱۲۰ نمونه به دست آمد. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری، حدود ۶/۵ گرم از هر پودر مخلوط، به صورت یکنواخت در یک استوانه چوبی با قطر ۳۰ میلی‌متر و عمق ۲۰ میلی‌متر ریخته شد. توسط یک تیغه، سطح پودر صاف و هموار گردید تا اثر سایه و توپوگرافی سطح بر بازتاب طیفی کاهش یابد (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌های آزمایش در داخل استوانه چوبی

سامانه تصویربرداری فراطیفی

در این پژوهش یک سامانه تصویربرداری فراطیفی مدل VA1000 ساخت شرکت NIT optics مبتنی بر دوربین اسکن خطی استفاده شد. در این دستگاه یک دوربین فراطیفی مدل VIRA-1000 با محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، با قدرت تفکیک طیفی ۲/۵ نانومتر و مکانی ۳۰۰ میکرومتر به کار گرفته شده است. در این سامانه از دو منبع نور تنگستن ۱۵۰ وات با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح نمونه به کار گرفته شده و همچنین از دو منبع نور اس‌ام‌دی ۳۰ وات برای ایجاد روشنایی یکنواخت و کاهش سایه استفاده شده است. پس از استقرار نمونه‌ها در زیر دوربین، فاصله سطح نمونه‌ها تا عدسی دوربین

آلودگی مغز پسته به سم آفلاتوکسین (Williams et al., 2025) و آلودگی قارچی مغز پسته (Kheiralipour et al., 2016) به کار گرفته شده است.

با مرور پیشینه پژوهش، غالب مطالعات بر روی تشخیص تقلب پسته با موادی همچون نخودسبز، اسفناج و بادام‌زمینی با استفاده از انواع روش‌های طیف‌سنجی یا تصویربرداری انجام شده است (Genis et al., 2021; Menevseoglu et al., 2021; Çınarer et al., 2024; Sezer et al., 2019; Taylan et al., 2026)، اما تشخیص تقلب پودر پسته با پودر باقلا با استفاده از ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی تاکنون به صورت جامع گزارش نشده است. با عنایت به حجم بالای داده‌های فراطیفی و پیچیدگی تفسیر آنها، بهره‌گیری از روش‌های هوشمند داده‌کاوی کاملاً ضروری است. شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی بالا در یادگیری الگوهای غیرخطی و طبقه‌بندی داده‌های پیچیده، گزینه‌ای ایده‌آل برای پردازش سیگنال‌های فراطیفی و تشخیص دقیق درصد تقلب محسوب می‌شوند.

بنابراین، هدف این پژوهش، توسعه یک روش سریع، غیرمخرب و دقیق بر پایه ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی به منظور تشخیص میزان تقلب پودر پسته با پودر باقلا است. امید است نتایج این تحقیق بتواند گامی مؤثر در جهت تضمین اصالت محصولات پسته و حفظ سلامت اقتصادی و غذایی جامعه بردارد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

مغز پسته رقم احمدآقایی که یکی از ارقام رایج و تجاری ایران به شمار می‌رود از بازار تهیه گردید. مغزها به صورت خام انتخاب شدند تا اثر حرارت بر ترکیبات طیفی به حداقل برسد. لازم به ذکر است پودر پسته از پسته خام تهیه می‌شود تا رنگ سبز طبیعی آن حفظ شود. دانه‌های باقلا نیز از بازار تهیه شدند. سپس یک روز پیش از انجام آزمایشات، مغزهای پسته و دانه‌های باقلا به طور جداگانه توسط آسیاب پودر شدند. پودرهای حاصل از الک با مش ۳۰ با گشودگی روزنه ۶۰۰ میکرومتر عبور داده شدند تا یکنواختی اندازه ذرات تضمین گردد. نمونه پودر پسته خالص و پودر باقلا خالص در کیسه‌های نیلونی در دمای محیط و دور از نور نگهداری شدند.

برای شبیه‌سازی تقلب، پودر باقلا با نسبت‌های وزنی مشخص به پودر پسته افزوده شد. برای این منظور از ترازوی

شده است (Trentanni Hansen *et al.*, 2019). در پژوهش حاضر عملکرد تشخیصی این روش مورد استفاده قرار گرفت.

شبکه عصبی مصنوعی

چالش اصلی تصویربرداری فراطیفی، حجم عظیم داده‌ها و وجود همبستگی بالا بین باندهای مجاور است. شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی کافی برای مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده بین داده‌های طیفی را دارند و به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در یادگیری ماشین در تحقیقات مشابه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Cevoli *et al.*, 2026; Nargesi *et al.*, 2024).

در تحقیق حاضر، یک شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (Multilayer Perceptron) متشکل از یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی طراحی شد. در شبکه در نظر گرفته شده، از توابع فعال‌سازی غیرخطی Tanh و Softmax به ترتیب برای لایه پنهان و خروجی استفاده شد. فرایند آموزش شبکه با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار خطا انجام گرفت. در این تحقیق از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها نیز برای آزمون استفاده شد. نرم‌افزار (IBM Modeler) نسخه ۱۸ در تحلیل مؤلفه‌های اصلی و مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار با تغییر تعداد نورون‌ها در لایه پنهان، معماری‌های مختلفی از شبکه عصبی را اعمال کرده و در نهایت توپولوژی که منجر به بهترین نتیجه می‌شود را به‌عنوان نتیجه ارائه می‌دهد.

نتایج و بحث

پس از مشاهده طیف‌ها، طول‌موج‌های ابتدایی و انتهای آنها به علت دارا بودن نویز زیاد از فرایند تحلیل حذف شده و ناحیه طیفی ۴۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. حذف بخشی از طول‌موج‌ها به علت ضعیف بودن اطلاعات طیفی و نویز در آن قسمت، توسط محققین دیگر نیز انجام شده است (Innamorato *et al.*, 2019). برای بررسی وجود اختلاف در بین طیف نمونه‌ها، طیف میانگین آنها ترسیم شد (شکل ۲).

نیز حدود ۵۰ سانتی‌متر تعیین شد. نرم‌افزار VA1000 نیز برای ثبت داده‌های طیفی مورد استفاده قرار گرفت.

قبل از هر مرحله تصویربرداری، کالیبراسیون بازتابی به روش زیر انجام شد:

تصویر مرجع سفید (White Reference): تصویربرداری از پودر سفید سولفات باریم دارای استاندارد آزمایشگاهی با بازتاب نزدیک به ۱۰۰ درصد (شکل ۱).

تصویر مرجع سیاه (Dark Reference): تصویربرداری با عدسی کاملاً پوشیده شده (شدت نور صفر) برای تصحیح جریان تاریک دوربین.

بازتاب نرمال شده برای هر پیکسل در هر طول موج طبق رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$R_{\lambda} = \frac{I_{raw} - I_{dark}}{I_{white} - I_{dark}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن R_{λ} بازتابش طیف برحسب درصد در طول موج λ ، I_{raw} شدت طیف خام نمونه؛ I_{dark} شدت طیف مرجع سیاه؛ I_{white} شدت طیف مرجع سفید است (Mishra *et al.*, 2017).

استانداردسازی نمونه‌ها

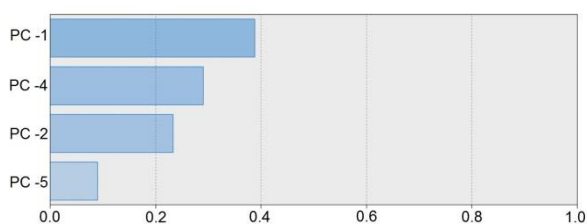
استانداردسازی یکی از مهم‌ترین مراحل پیش‌پردازش در یادگیری ماشین است و نوعی از مقیاس‌بندی ویژگی (Feature Scaling) به شمار می‌آید که دامنه ویژگی‌ها را به مقیاسی استاندارد تبدیل می‌کند. مهم‌ترین هدف آن این است که ویژگی‌های ورودی مدل به مقیاسی یکنواخت و مناسب برای آموزش تبدیل شوند. در این تحقیق از روش استانداردسازی کمینه-بیشینه Min-Max که مقدار داده‌ها در بازه‌ای از صفر تا یک قرار می‌گیرند استفاده شده است (رابطه ۲):

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

که در آن، X_{norm} مقدار نرمال شده ورودی، X_i داده ورودی، X_{min} و X_{max} به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل داده‌ها می‌باشد.

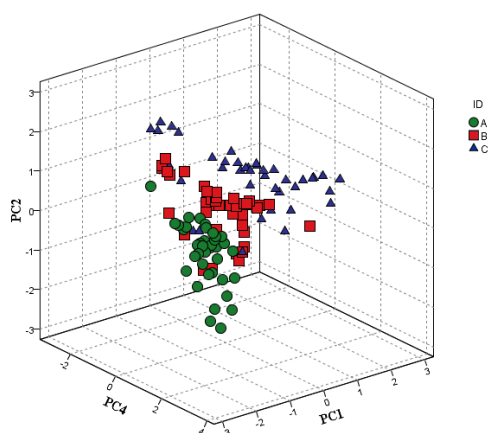
تحلیل مؤلفه‌های اصلی

نخستین مرحله از تحلیل داده‌های طیفی برای درک الگوهای احتمالی و داده‌های پرت، اغلب تحلیل مؤلفه‌های اصلی است (Cortés *et al.*, 2019). تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش کاهش ابعاد داده‌ها توسط جستجو نمودن یک ترکیب خطی از مولفه‌هایی که به یکدیگر وابستگی نداشته و به بهترین شکل واریانس داده‌ها را توصیف می‌نمایند شناخته



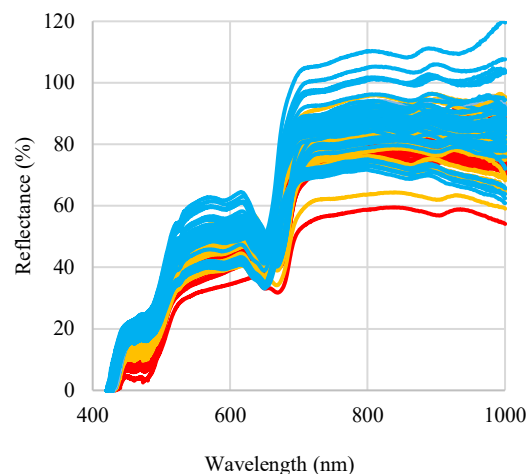
شکل ۳- میزان اهمیت مؤلفه‌های اصلی

با وجود اختلاف بین طیف‌های میانگین، می‌توان در رابطه با عملکرد مدل تفکیک‌کننده استنباط بهتری داشت. همچنین برای درک بهتر تفکیک‌پذیری نمونه‌ها از یکدیگر، وضعیت طیف نمونه‌ها در مختصات مؤلفه‌های اول، دوم و سوم ترسیم شدند (شکل ۴). استفاده از روش PCA و بررسی وضعیت پراکندگی نمونه‌ها در مختصات مؤلفه‌های اصلی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (Horn *et al.*, 2018; Teye *et al.*, 2019). شکل ۴ نشان می‌دهد که تفکیک مناسبی بین نمونه‌ها از نظر واریانس بین رده‌ها و واریانس درون رده‌ها وجود دارد که این موضوع می‌تواند برای دستیابی به مدل طبقه‌بندی با دقت بالا امیدوارکننده باشد.

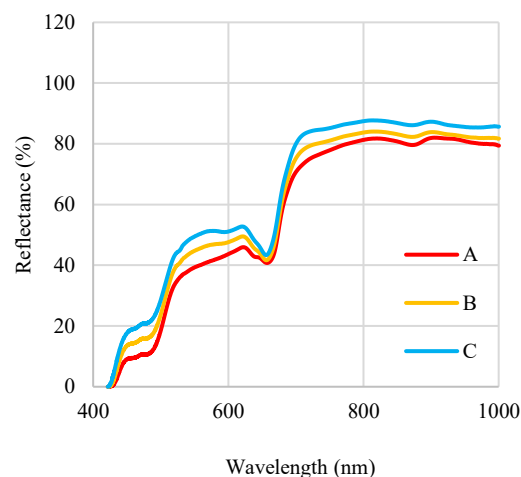


شکل ۴- تفکیک‌پذیری رده‌ها با استفاده از سه مؤلفه اصلی PC1، PC2 و PC4

نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، یک شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون سه لایه متشکل از یک لایه پنهان با سه نورون ارائه نمود که تعداد نورون‌ها توسط نرم‌افزار و بر اساس عملکرد بهینه انتخاب شده است. برای لایه ورودی، تعداد چهار نورون به تعداد چهار مؤلفه اصلی و برای لایه خروجی نیز سه نورون برای طبقه‌بندی نمونه‌ها در سه رده A، B و C در نظر گرفته شد.



الف



ب

شکل ۲- (الف) طیف‌های هر سه رده و (ب) میانگین طیف‌ها

در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، متغیرهای جدیدی ایجاد می‌شود که هر کدام یک ترکیب خطی از متغیرهای اصلی هستند. این متغیرهای جدید که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند، بیشترین اطلاعات موجود در ماتریس متغیرهای اصلی را در خود دارند. اولین مؤلفه اصلی بیشترین واریانس یا اطلاعات داده‌ها را دربر دارد در حالی که مؤلفه اصلی دوم اطلاعاتی را در خود دارد که توسط مؤلفه اصلی اول ارائه نشده است و این رویه به همین ترتیب در مؤلفه‌های بعدی نیز وجود دارد (Callao & Ruisánchez, 2018). پس از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در نرم‌افزار IBM Modeler، تمامی مؤلفه‌های اصلی بر اساس میزان اهمیت آنها ارائه می‌شوند. در تحقیق حاضر، صرفاً مؤلفه‌های اصلی PC1، PC2، PC4 و PC5 دارای اهمیت معرفی شده‌اند که ترتیب اهمیت آنها نیز مطابق شکل ۳ می‌باشد.

واقعی	A	۲۵	۰	۰	۱۰۰
	B	۰	۲۹	۰	۱۰۰
	C	۰	۱	۲۸	۹۶/۵۵
دقت		۱۰۰	۹۶/۶۷	۱۰۰	صحت ۹۸/۸۰

الف

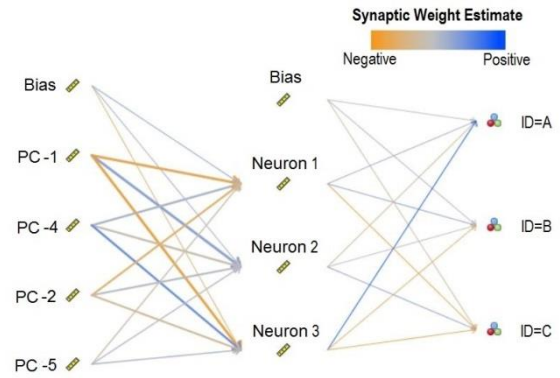
آزمون	پیش‌بینی			حساسیت	
	A	B	C		
واقعی	A	۱۵	۰	۰	۱۰۰
	B	۰	۱۱	۰	۱۰۰
	C	۰	۲	۹	۸۱/۸۲
دقت		۱۰۰	۸۴/۶۲	۱۰۰	صحت ۹۴/۵۹

ب

شکل ۶- ماتریس اغتشاش مجموعه‌داده (الف) آموزش و (ب) آزمون مدل

اما آنچه که تحقیق حاضر را از سایر تحقیقات در این مقوله متمایز می‌نماید، بهره‌مندی از سامانه تصویربرداری فراطیفی و استفاده از پودر باقلا به‌عنوان ماده تقلب است. باقلا به‌عنوان محصولی ارزان و رایج در کشور، مورد سوءاستفاده افراد متقلب قرار گرفته که واکنش مسئولین امر را در پی داشته است که دلیل پرداختن به آن در تحقیق حاضر بوده است.

تصویربرداری فراطیفی با ثبت طیف وسیعی از طول‌موج‌ها، امکان توصیف دقیق اجزای بیوشیمیایی موجود در پسته، از جمله پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی و اسیدهای چرب را فراهم می‌کند (Martínez-Peña et al., 2026). طیف‌های بازتابی نتیجه ساختار و طبیعت شیمیایی ماده مورد بررسی بوده و وجود پیوندهای مختلف و اثر تداخلی آنها در طیف‌های بازتابی از چالش‌های جدی در تفسیر شکل طیف‌های اخذ شده هستند. مواد غذایی ارگانیک شامل گروه‌های عاملی X-H هستند و در تحلیل‌های کمی و کیفی، متناسب کردن نواحی جذب و به طبع آن بازتاب به گروه‌های



شکل ۵- توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی

ماتریس اغتشاش مجموعه داده‌های آموزش و آزمون در شکل ۶ آورده شده است. همان‌گونه که در این دو ماتریس آورده شده است، صحت (Accuracy) مجموعه آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۹۸/۸۰ و ۹۴/۵۹ است که صحت بالایی محسوب می‌شود. میزان خطای رخ داده، مربوط به تشخیص رده B بوده و در دو رده دیگر، میزان دقت (Precision) ثبت شده برابر ۱۰۰ درصد است. بنابراین نتایج حاکی از آن است که ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی مصنوعی قادر به تفکیک سه رده بوده و به‌ویژه در تشخیص پودر خالص پسته از دقت کامل برخوردار است.

همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، تحقیقات متعددی در خصوص تقلب در پودر پسته انجام‌گرفته که فهرستی از تحقیقات اخیر در جدول ۱ ارائه شده است. غالب تحقیقات مذکور در کشور ترکیه که از کشورهای پیشرو در تولید پسته محسوب می‌شود انجام شده‌اند و از موادی همچون نخودسبز و اسفناج برای تقلب در پودر پسته استفاده شده است که ظاهراً به‌عنوان مواد رایج در تقلب پودر پسته در آن کشور به شمار می‌آیند. آنچه از جدول ۱ قابل‌مشاهده است، علی‌رغم به‌کارگیری سامانه‌های مختلف و روش‌های متفاوت یادگیری ماشین در تحقیقات، نتایج بسیار خوبی حاصل شده است. نتیجه تحقیق حاضر نیز به‌خوبی سایر تحقیقات بوده است. گرچه صحت تنها معیار برای شناسایی بهترین روش نیست و معیارهای دیگری همچون سادگی، سرعت و مقرون به‌صرفه‌بودن روش‌ها نیز می‌تواند ملاک انتخاب باشد.

آموزش	پیش‌بینی			حساسیت
	A	B	C	

عاملی، کار ساده‌ای نیست (Jamshidi, 2012). پسته دارای اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسیدهای اولئیک و لینولئیک، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر و عناصری مثل کلسیم، پتاسیم، فسفر، آهن، مس و ویتامین‌ها و ترکیبات فنولیک است (Khadivi et al., 2025). عمده ترکیبات موجود در باقلا، کربوهیدرات‌ها و پروتئین است. با در نظر گرفتن تنوع پیوندهای موجود در پسته در کنار ترکیبات باقلا و همپوشانی‌ها، تفسیر طیف‌های جذبی و بازتابی را بسیار دشوار نموده است.

جدول ۱- نتایج سایر تحقیقات در خصوص تقلب در پودر پسته.

روش	یادگیری ماشین ^a	مواد تقلب	نتایج	منبع
طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک	PCA	نخودسبز و اسفناج	ضریب تعیین ۰/۹۹	Genis et al., 2021
طیف‌سنجی رامان	GA	نخودسبز	ضریب تعیین ۰/۹۴	Taylan et al., 2021
پردازش تصویر	CNN	اسفناج	صحت ۱۰۰٪	Çinarer et al., 2024
طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری	PCA	نخودسبز و اسفناج	ضریب تعیین ۰/۹۹	Sezer et al., 2019
تصویربرداری فراطیفی رامان	PLSR	نخودسبز	ضریب تعیین ۰/۹۹	Eksi-Kocak et al., 2016
طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک	PLSR	نخودسبز	ضریب همبستگی ۰/۹۹	Temizkan et al., 2020
پردازش تصویر	ANN	نخودسبز	صحت ۹۳/۶۵٪	Doğan et al., 2023
تصویربرداری فراطیفی	ANN	باقلا	صحت ۹۴/۵۹٪	تحقیق حاضر

^a PCA: Principal Component Analysis; GA: Genetic Algorithm; CNN: Convolutional Neural Network; PLSR: Partial Least Squares Regression; ANN: Artificial Neural Networks

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش نوین، سریع و غیرمخرب مبتنی بر ترکیب تصویربرداری فراطیفی در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر و شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چندلایه برای شناسایی تقلب پودر پسته با پودر باقلا توسعه داده شد. یافته‌ها نشان داد که روش مذکور قادر است با دقت بسیار خوبی، نمونه‌های خالص را از نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف باقلا (۲۵ و ۵۰ درصد) تفکیک کند. این رویکرد باتوجه به غیرمخرب بودن و سرعت بالا، پتانسیل عملی چشمگیری برای یکپارچه‌سازی در خطوط تولید صنایع غذایی، آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت و سامانه‌های نظارتی دارد. به‌طور کلی، ترکیب تصویربرداری فراطیفی و شبکه عصبی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد و قابل‌اعتماد برای حفظ اصالت پسته، جلوگیری از تقلب اقتصادی و حمایت از حقوق مصرف‌کننده مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش‌های آتی، کارایی این روش برای تشخیص سایر مواد تقلبی، توسعه مدل با داده‌های وسیع‌تر و شامل درصد‌های پایین‌تر (مثلاً ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و همچنین اعتبارسنجی روی خط تولید واقعی، به‌عنوان گام بعدی پیشنهاد می‌شود.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به‌صورت زیر است:

- نویسنده اول: داده‌برداری طیفی، داده‌کاوی، بازبینی و ویرایش متن.
- نویسنده دوم: آماده‌سازی نمونه‌ها، داده‌برداری طیفی، آماده‌سازی داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اولیه.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله گزارش شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این مقاله رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

109378.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109378>
- Horn, B., Esslinger, S., Pfister, M., Fahl-Hassek, C. and Riedl, J. 2018. Non-targeted detection of paprika adulteration using mid-infrared spectroscopy and one-class classification—Is it data preprocessing that makes the performance? *Food chemistry*, 257, 112-119.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.007>
- Innamorato, V., Longobardi, F., Lippolis, V., Cortese, M., Logrieco, A.F., Catucci, L., Agostiano, A. and De Girolamo, A. (2019). Tracing the Geographical Origin of Lentils (*Lens culinaris Medik.*) by Infrared Spectroscopy and Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 12(3), 773-779.
<https://doi.org/10.1007/s12161-018-1406-8>
- Jamshidi, B., (2012). Non-destructive Taste Characterization and Classification of Oranges Using Vis/NIR Spectroscopy, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Khadivi, A., Nikoogoftar-Sedghi, M., & Tunç, Y. (2025). Agronomic characteristics, mineral nutrient content, antioxidant capacity, biochemical composition, and fatty acid profile of Iranian pistachio (*Pistacia vera L.*) cultivars. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1-21.
<https://doi.org/10.1186/s12870-025-06094-9>
- Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Javan-Nikkhah, M., Jayas, D. S., & Siliveru, K. (2016). Detection of fungal infection in pistachio kernel by long-wave near-infrared hyperspectral imaging technique. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 8(1), 129-135.
- Martínez-Peña, R., Castillo, S., Vélez, S., & Álvarez, S. (2026). HSI and ML for non-destructive pistachio quality assessment: Influence of location and irrigation on nutrient and fat composition. *Food Control*, 112011.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112011>
- Menevseoglu, A., Aykas, D. P., & Adal, E. (2021). Non-targeted approach to detect green pea and peanut adulteration in pistachio by using portable FT-IR, and UV-Vis spectroscopy. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 1075-1082. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00710-y>
- Mishra, P., Mohd Asaari, M.S., Herrero-Langreo, A., Lohumi, S., Diezma, B., & Scheunders, P. (2017). Close range hyperspectral imaging of plants: A review. *Biosystems Engineering*, 164, 49-67.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.009>
- Mohammadi-Moghaddam, T., Razavi, S. M., Taghizadeh, M., Pradhan, B., Sazgarnia, A., & Shaker-Ardekani, A. (2018). Hyperspectral imaging as an effective tool for prediction the moisture content and textural characteristics of roasted pistachio kernels. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1493-1502.
<https://doi.org/10.1007/s11694-018-9764-x>
- حمایت مالی**
- نویسندگان هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.
- منابع**
- Aqeel, M., Sohaib, A., Iqbal, M., & Ullah, S. S. (2025). Milk adulteration identification using hyperspectral imaging and machine learning. *Journal of Dairy Science*, 108(2), 1301-1314.
<https://doi.org/10.3168/jds.2024-25635>
- Callao, M. P., & Ruisánchez, I. (2018). An overview of multivariate qualitative methods for food fraud detection. *Food Control*, 86, 283-293.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.11.034>
- Cevoli, C., Mingrone, M., & Fabbri, A. (2026). Hyperspectral imaging and linear and nonlinear machine learning for tracing the geographical origin of pistachios. *Food Control*, 184, 112048.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112048>
- Çinarer, G., Doğan, N., Kılıç, K., & Doğan, C. (2024). Rapid detection of adulteration in pistachio based on deep learning methodologies and affordable system. *Multimedia Tools and Applications*, 83(5), 14797-14820. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16172-5>
- Cortés, V., Blasco, J., Aleixos, N., Cubero, S., & Talens, P. (2019). Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 138-148.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.015>
- Doğan, C., Şehirli, E., Doğan, N., & Buran, İ. (2023). Non-targeted approach to detect pistachio authenticity based on digital image processing and hybrid machine learning model. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(2), 1693-1702. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01671-0>
- Eksi-Kocak, H., Menten-Yilmaz, O., & Boyacı, I. H. (2016). Detection of green pea adulteration in pistachio nut granules by using Raman hyperspectral imaging. *European Food Research and Technology*, 242(2), 271-277.
<https://doi.org/10.1007/s00217-015-2538-3>
- Faqeerzada, M. A., Lohumi, S., Kim, G., Joshi, R., Lee, H., Kim, M. S., & Cho, B. K. (2020). Hyperspectral shortwave infrared image analysis for detection of adulterants in almond powder with one-class classification method. *Sensors*, 20(20), 5855.
- Genis, H. E., Durna, S., & Boyacı, I. H. (2021). Determination of green pea and spinach adulteration in pistachio nuts using NIR spectroscopy. *Lwt*, 136, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110008>
- He, H. J., Chen, Y., Li, G., Wang, Y., Ou, X., & Guo, J. (2023). Hyperspectral imaging combined with chemometrics for rapid detection of talcum powder adulterated in wheat flour. *Food Control*, 144,

- Additives & Contaminants: Part A, 1-19. <https://doi.org/10.1080/19440049.2025.2597288>
- Temizkan, R., Doğan, M. A., Atakan, O., Nazlım, B. A., & Ayvaz, H. (2020). Rapid detection of green pea adulteration in ground pistachio nuts using near and mid-infrared spectroscopy. *International Journal of Agriculture Forestry and Life Sciences*, 4(1), 71-78.
- Teye, E., Amuah, C.L., McGrath, T. and Elliott, C. (2019). Innovative and rapid analysis for rice authenticity using hand-held NIR spectrometry and chemometrics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.03.085>
- Trentanni Hansen, G. J., Almonacid, J., Albertengo, L., Rodriguez, M. S., Di Anibal, C., & Delrieux, C. (2019). NIR-based Sudan I to IV and Para-Red food adulterants screening. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(8), 1163-1172. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1619940>
- Williams, L., Shukla, P., Sheikh-Akbari, A., Mahroughi, S., & Mporas, I. (2025). Measuring the level of aflatoxin infection in pistachio nuts by applying machine learning techniques to hyperspectral images. *Sensors*, 25(5), 154
- Nargesi, M. H., Amiriparian, J., Bagherpour, H., & Kheiralipour, K. (2024). Detection of different adulteration in cinnamon powder using hyperspectral imaging and artificial neural network method. *Results in Chemistry*, 9, 101644. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101644>
- Park, J. J., Cho, J. S., Lee, G., Yun, D. Y., Park, S. K., Park, K. J., & Lim, J. H. (2023). Detection of red pepper powder adulteration with allura red and red pepper seeds using hyperspectral imaging. *Foods*, 12(18), 3471.
- Sezer, B., Apaydin, H., Bilge, G., & Boyaci, I. H. (2019). Detection of Pistacia vera adulteration by using laser induced breakdown spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(5), 2236-2242.
- Taylan, O., Cebi, N., Yilmaz, M. T., Sagdic, O., Ozdemir, D., & Balubaid, M. (2021). Rapid detection of green-pea adulteration in pistachio nuts using Raman spectroscopy and chemometrics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(4), 1699-1708.
- Taylan, O., Bulut, M., Cebi, N., Sagdic, O., & Celebi, Y. (2026). Explainable AI-assisted hybrid self-organising maps and deep learning algorithms for detecting pistachio adulteration with peas. *Food*