

Research Article

Determination of the purity of black pepper powder using hyperspectral imaging and support vector machine methods

Mohammad Hossein. Nargesi¹, Jafar. Amiri parian^{1*}, Kamran. Kheiralipour²

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Biosystems Mechanical Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

(Received Data: 15 June 2024, Revised Data: 22 July 2024, Accepted Data: 13 August 2024)

Introduction:

Plants and spices are the source of many biologically active substances that can enhance the taste, color, and aroma of food, as well as influence the body's digestion and metabolic processes. A spice is a dried seed, fruit, root, bark, or vegetable substance primarily used for seasoning, coloring, or preserving food. Sometimes, spices are also used to mask other flavors. On the one hand, many spices have antimicrobial, anti-diabetic, anti-inflammatory, and anti-hypertensive properties. Black pepper, in particular, has been used as a pain reliever in traditional medicine for centuries. This plant has been cultivated since ancient times both as a spice and as a medicinal herb, and it has also been a significant commercial product. Emerging scientific techniques, such as hyperspectral imaging, are now used to evaluate the quality and purity of agricultural and food products. The purpose of this study is to determine the purity of black pepper powder using hyperspectral image processing techniques.

Materials and Methods: The line scan camera from the university's image processing workshop was used to conduct this research. Adulterants such as wheat flour, peas, and sea foam were mixed with black pepper powder at impurity levels of 0%, 5%, 15%, 30%, and 50%. Three samples were prepared for each level of impurity and stored in zip bags. Six images were recorded from each sample. A total of 270 hyperspectral images were recorded. MATLAB software was used to analyze these images. The samples underwent pre-processing, which included the selection of length, features, and characteristics. Efficient features were then classified using the support vector machine method.

Results and discussion: The confusion matrices of the support vector machine classifier model were calculated using one-for-one and one-for-all strategies to determine the correct classification rate for black pepper fraud detection. The accuracy of the support vector machine classification model with the

* Corresponding author: amiriparian@basu.ac.ir

one-against-one strategy in detecting adulteration with wheat flour, sea foam, and chickpea flour in black pepper was 98.88%, 98.88%, and 95.55%, respectively. Using the one-against-all strategy, the accuracy was 100%, 91.11%, and 93.33%, respectively.

Conclusions: In the present study, the classification of different levels of adulteration in black pepper was performed using the hyperspectral image processing method and support vector machine. Due to the varying levels of adulteration, two strategies were employed: one-against-one and one-against-all, with the one-against-one strategy yielding better performance. Besides, this research method offers several advantages over traditional laboratory methods, including non-destructiveness, high speed, and low cost. It is suggested to explore other classification methods for hyperspectral images to further improve the detection of impurities in black pepper.

Keywords: Black pepper powder, purity determination, hyperspectral imaging, image processing, SVM.

How to cite this article:

Nargesi, M. H., Amiri parian, J., Kheiralipour, K. (2024). Determination of the purity of black pepper powder using hyperspectral imaging and support vector machine methods., *Innov. Food Technol.*, 11(4), 295-312., DOI: <https://doi.org/10.22104/ift2024.6934.2174>

مقاله پژوهشی

تعیین خلوص پودر فلفل سیاه به روش تصویربرداری فراطیفی

محمدحسین نرگسی^۱، جعفر امیری پریان^{۲*}، کامران خیرعلی پور^۳

۱. دانشجو دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳)

چکیده

بررسی میزان خلوص پودر فلفل سیاه با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، کاری پیچیده، زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند تخصص است. تصویربرداری فراطیفی، به‌عنوان ابزار توانمندی در بررسی کیفیت محصولات مختلف مورد توجه محققین است. در پژوهش حاضر، نمونه‌های پودر فلفل سیاه خالص و مخلوط با افزودنی‌های آرد گندم، کف دریا و آرد نخود در سطوح مختلف از صفر تا ۵۰٪ تهیه شد و سپس تصاویر فراطیفی نمونه‌ها نیز با استفاده از سامانه تصویربرداری فراطیفی اسکن خطی به ثبت رسید. به‌منظور پردازش تصاویر فراطیفی، الگوریتمی در نرم‌افزار مطلب طراحی شد. با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی، طول موج‌های مؤثر انتخاب شدند. پس از استخراج ویژگی در طول موج‌های مؤثر، ویژگی‌های کارا انتخاب و براساس روش ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شدند. دقت مدل طبقه‌بند با راهبرد، یکی در برابر یکی در تشخیص ناخالصی آرد گندم، آرد نخود، و کف دریا در فلفل سیاه، به ترتیب برابر ۹۸/۸۸٪، ۹۵/۵۵٪ و ۹۸/۸۸٪ و دقت آن با راهبرد یکی در برابر همه، به ترتیب برابر ۱۰۰٪، ۹۳/۳۳٪ و ۹۱/۱۱٪ بود. الگوریتم پردازش تصویر طراحی شده با کمک مدل طبقه‌بند با راهبرد یکی در برابر یکی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد در بررسی کیفیت پودر فلفل سیاه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پودر فلفل سیاه، تعیین خلوص، تصویربرداری فراطیفی، پردازش تصویر، ماشین بردار پشتیبان.

۱. مقدمه

به قسمتی از گیاه که خاصیت خشک‌شدن و کاربرد غذایی دارد و به صورت دانه یا پودر در طبخ مواد غذایی، به عنوان رنگ و عطروطعم‌دهنده استفاده می‌شود، ادویه می‌گویند [۱]. فلفل سیاه با نام علمی (*Piper nigrum L*)، درختی گل‌دار که بومی آسیای جنوبی است و در فراوری مواد غذایی جایگاه ویژه‌ای دارد [۲]. استفاده از مواد غذایی طبیعی با کمترین مقدار افزودنی، همواره کانون توجه مصرف‌کنندگان در بسیاری از کشورها است [۳]؛ بنابراین، تعیین خلوص مواد غذایی و محصولات کشاورزی از جمله فلفل سیاه، عملیاتی مهم و ضروری محسوب می‌شود.

یکی از مسائل چالش‌برانگیز در حوزه مواد غذایی، تعیین خلوص و تشخیص تقلب در آن‌هاست [۴]؛ چراکه این مسئله با انگیزه بهره‌وری اقتصادی صورت می‌گیرد که تهدید بسیار بزرگی برای سلامت افراد است [۵-۶]. تقلب با اضافه کردن مواد ارزان قیمت و رنگ‌ها به محصولات غذایی ایجاد می‌شود و وارد بازار فروش می‌شود [۷-۸]. تقلب‌های مختلفی به منظور بهره اقتصادی بیشتر در فلفل سیاه صورت می‌پذیرد که خلوص آن را پایین می‌آورد. رایج‌ترین تقلب‌ها، استفاده از آرد گندم، آرد نخود و کف دریا است که باعث عدم رضایت مصرف‌کننده می‌شود. بررسی‌های مختلفی جهت تعیین خلوص مواد غذایی صورت گرفته است، از جمله: آزمون پنل [۹]، کروماتوگرافی گازی [۱۰]، آزمایش‌های میکروسکوپی و روش‌های اسپکتروفتومتری [۱۱-۱۲] و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز (PCR) [۱۳]. اغلب این روش‌ها برای تعیین خلوص مواد غذایی موفق بوده‌اند؛ اما این روش‌ها پیچیده، زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند افراد متخصص هستند [۱۴]. تصویربرداری و پردازش تصاویر فراطیفی (HSI) در حوزه بینایی رایانه‌ای بوده که به عنوان یکی از ابزارهای نوین، سریع، مناسب، دقیق و کارآمد، برای سنجش کیفیت و طبقه‌بندی مواد غذایی به کار می‌رود [۴۶-۴۷].

روش‌های مختلف تصویربرداری در حوزه مرئی یا آرجی بی^۱ (RGB) و فرورسرخ نزدیک^۲ (NIR) برای ارزیابی کیفیت

و ایمنی مواد غذایی استفاده شده است. در HSI^۳، علاوه بر اطلاعات طیفی، اطلاعات مکانی هم فراهم می‌شود؛ چراکه تصویربرداری فراطیفی ترکیبی از تصویربرداری مرسوم و طیف‌سنجی است [۱۵-۱۶]. روش HSI دارای کاربرد فراوانی در بررسی مواد کشاورزی و غذایی است [۱۹-۲۲]، [۴۸-۴۹]. تصویربرداری فراطیفی، برای بررسی محصولات کشاورزی مانند گندم [۲۳]، مرکبات [۹ و ۲۴] برنج [۲۵] و پسته [۲۶] استفاده شده است. در حوزه تعیین خلوص مواد غذایی، این روش برای تشخیص سبوس گندم، سبوس برنج، آرد ذرت و پودر رزین در فلفل سیچوان^۴ به کار برده شده است [۱۷]. افزون‌براین، HSI برای تعیین خلوص پودر فلفل قرمز مخلوط‌شده با مواد رنگی استفاده شد [۱۸]. در تحقیق حاضر، در نظر دارد تا از این روش برای تعیین خلوص پودر فلفل سیاه استفاده کند.

تصویربرداری فراطیفی یک ابر مکعب ایجاد کرده که شامل تعداد زیادی متغیر است. عملیات پردازش تصویر برای استخراج و تفسیر اطلاعات مربوطه از این داده‌های طیفی ضروری است [۴۰]. از آن‌جا که طیف اصلی به دست آمده از تصویربرداری فراطیفی می‌تواند تحت تأثیر مسائلی مانند اثرات پراکندگی، نویز تصادفی و نویز سامانه قرار گیرد و سیگنال طیفی را ضعیف کرده و عملکرد مدل‌ها را کاهش دهند، پیش‌پردازش تصاویر به عنوان اولین مرحله در پردازش تصاویر فراطیفی قرار می‌گیرد [۵۶-۵۷]. نمونه‌های جامد اغلب دارای سطوح غیریکنواخت هستند و می‌توانند نور را در طول بازتاب پراکنده و در نتیجه اثرات افزایشی و ضریبی ایجاد کنند. این اثرات پراکندگی نور را می‌توان با الگوریتم‌های طول موج مؤثر و ویژگی کارا اصلاح کرد [۴۱]. پس از آن، ویژگی‌های کارا تحلیل می‌شوند، برای طبقه‌بندی یا پیش‌بینی اهداف خاصی به کار می‌روند.

طبقه‌بندی و یا پیش‌بینی ویژگی‌های تصاویر از روش‌های مختلفی انجام می‌شود [۵۰-۵۵]. در مطالعه حاضر، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) به عنوان یک الگوریتم یادگیری ماشین، به منظور طبقه‌بندی ویژگی‌های کارا

^۱. Red, green, blue

^۲. Near infrared

^۳. Hyperspectral imaging

^۴. Sichuan pepper

طبقه‌بند مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان در تشخیص افزودنی آرد گندم، نخود و پودر کف دریا با سطوح مختلف در پودر فلفل سیاه بررسی شده است.

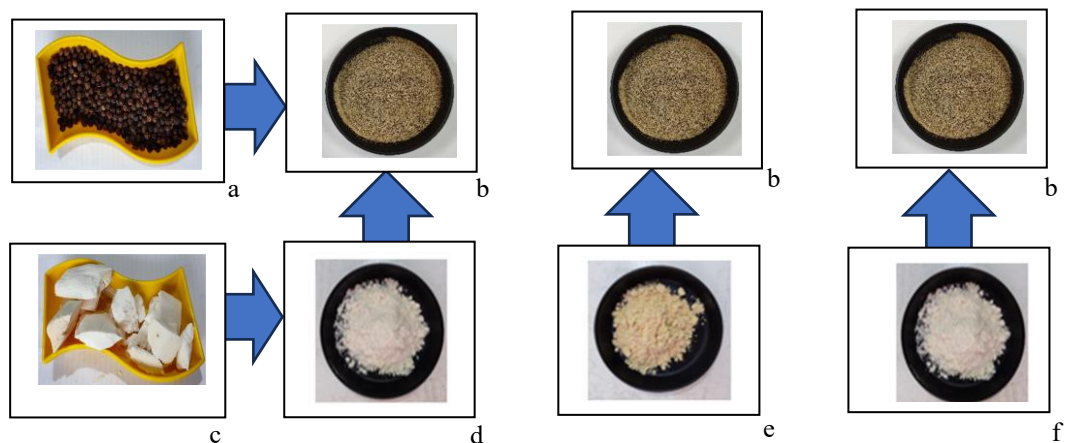
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا دانه‌های فلفل سیاه از بازار ایلام (برای حصول اطمینان از خلوص آن‌ها) تهیه و سپس آسیاب شدند تا پودر فلفل به دست آید (شکل ۱). آرد گندم آماده و بسته‌بندی شده، نخود و کف دریا پودر نشده نیز از بازار خریداری و آسیاب شدند. با مخلوط نمونه‌های آرد گندم، آرد نخود و پودر کف دریا با پودر فلفل سیاه، درجات خلوص مختلفی از پودر فلفل به دست آمد.

استفاده شده است. SVM، به دلیل توانایی در مدیریت داده‌هایی با ابعاد بالا، بدون حساسیت بی‌مورد، مشهور است. این روش، مختص طبقه‌بندی و رگرسیون با وجود نمونه‌های آموزشی محدود در فضاهای با ابعاد بالا است. این الگوریتم به دنبال یافتن ابرصفحه‌ای است که فاصله بین خود و نزدیک‌ترین نمونه‌ها را از هر یک از دو طبقه به حداکثر برساند [۴۲]. برای جلوگیری از تطبیق بیش از حد، SVM تابع تصمیم طبقه‌بندی را براساس اصل به‌حداقل‌رساندن خطر ساختاری تنظیم می‌کند، نه فقط به‌حداقل‌رساندن خطای طبقه‌بندی اشتباه در مجموعه آموزشی [۴۳-۴۴].

باتوجه به اهمیت بالای تعیین خلوص مواد غذایی پودری و مزایا و کاربردهای فناوری تصویربرداری فراطیفی، هدف از تحقیق حاضر طراحی الگوریتم پردازش تصاویر فراطیفی به منظور بررسی کیفیت پودر فلفل سیاه است. در این تحقیق قابلیت تشخیص الگوریتم طراحی شده همراه با مدل



شکل (۱) مواد اصلی و افزودنی شامل: (a) دانه فلفل سیاه، (b) پودر فلفل سیاه، (c) کف دریا، (d) پودر کف دریا، (e) آرد نخود، و (f) آرد گندم.

Fig 1. Original and added ingredients include, a) black pepper seeds, b) black pepper powder, c) sea foam, d) sea foam powder, e) chickpea flour, and f) wheat flour.
















گرم از نمونه آماده‌شده در کیسه زیپ‌دار ریخته شد. برای هر گروه از درصدهای مختلف افزودنی‌های تحت بررسی سه نمونه تهیه شد تا در مرحله اکتساب تصویر استفاده شوند (شکل ۲).

تصاویر نمونه‌ها در آزمایشگاه پردازش تصویر دانشگاه ایلام تهیه شد. برای این کار، از سامانه تصویربرداری فراطیفی اسکن خطی ساخت شرکت پرتو صنعت زنجان، با گستره

باتوجه به این‌که در اندازه ذرات پودر و همچنین مصنوعات اضافه‌شده تفاوت وجود داشت، دانه‌بندی نمونه‌های پودر شده با استفاده از الک با مش ۳۰۰ میکرومتر انجام شد [۴۵]. در ادامه، برای تهیه نمونه‌های فلفل سیاه با درجه‌های خلوص مختلف، مقادیر مختلفی از آرد گندم، آرد نخود، و پودر کف دریا با درصدهای وزنی، ۵٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ به پودر فلفل سیاه خالص اضافه شد. برای انجام آزمایش، ۱۰

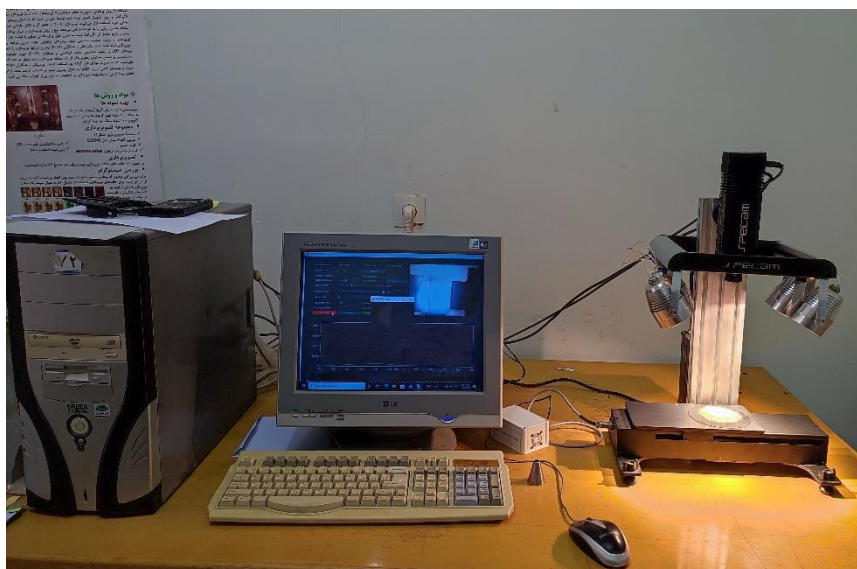
نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۶، شرکت متورکس، کارلس‌بد، کالیفرنیا، آمریکا^۱، استفاده شد. الگوریتمی برای پردازش تصاویر فراطیفی طراحی و در نرم‌افزار متلب کدنویسی شد (شکل ۳).

طول موج ۴۰۰ تا ۹۵۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۳). با تهیه شش تصویر از هر نمونه، شش تصویر فراطیفی گرفته شد؛ به طوری که برای هر نوع ناخالصی، ۹۰ تصویر ثبت و در مجموع ۲۷۰ تصویر فراطیفی برای همه انواع ناخالصی ثبت شد. برای تجزیه و تحلیل تصاویر فراطیفی (فرامکعب) از

Material	0%	5%	15%	30%	50%
Black pepper+ wheat flour					
Black pepper +chickpea flour					
Black pepper+ sea foam					

شکل (۲) نمونه‌های مختلف فلفل سیاه با درصدهای مختلف افزودنی.

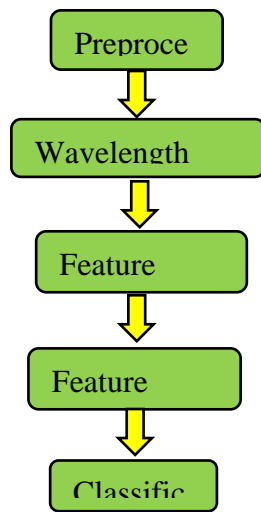
Fig 2. Different samples of black pepper with different percentages of added materials.



شکل (۳) سامانه تصویربرداری فراطیفی

Fig. 3. Hyperspectral imaging system

¹. MathWorks Inc., Carlsbad, California, USA



شکل (۳). مراحل مختلف سامانه تعیین خلوص پودر فلفل سیاه.
 Fig 3. Different stages of the purity detection system of black pepper powder.

۳. نتایج و بحث

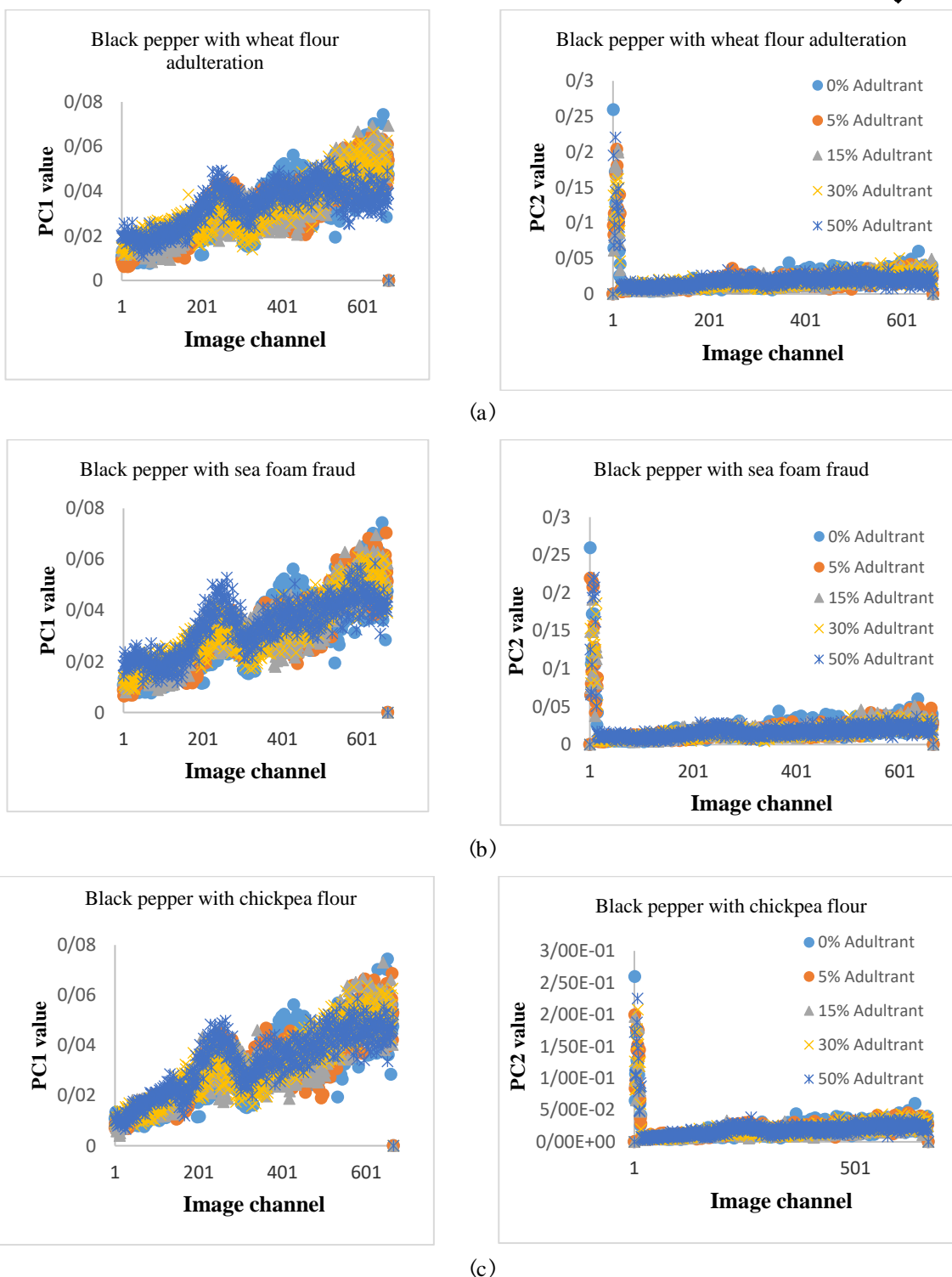
۱.۱. طول موج مؤثر

طبق شکل (a۴) مؤلفه‌های اصلی اول و دوم نمونه‌های فلفل سیاه مخلوط با آرد گندم، در تمام طول موج‌ها در ۵ سطح مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۵۰٪) محاسبه شد. بزرگ‌ترین قله موج به‌عنوان کانال مؤثر تصویر انتخاب شد [۲۳ و ۲۶]. با استفاده از انطباق کانال بر طول موج تصویر، طول موج مؤثر (کارا) انتخاب شد. طول موج‌های کارای تصاویر فراطیفی پودر فلفل سیاه مخلوط با آرد گندم شامل ۵۹۸/۰۳، ۶۰۵/۴۶، ۷۳۴/۴۵، ۷۷۸/۲۷، ۸۹۲/۳۷ و ۹۲۷/۱۰ نانومتر بود. به همین صورت برای دو افزودنی پودر کف دریا و آرد نخود نیز طول موج‌های مؤثر انتخاب شد (شکل b۴ و c۴). طول موج‌های مؤثر مربوط به تصاویر فراطیفی نمونه‌های فلفل سیاه مخلوط با پودر کف دریا ۶۰۶/۲۹، ۶۴۳/۴۹، ۷۳۸/۵۸، ۷۶۰/۹۱، ۸۶۰/۹۵ و مخلوط با آرد نخود، شامل ۹۲۷/۱۰، ۴۰۱/۲۳، ۶۱۸/۶۹، ۷۳۴/۴۵، ۷۷۴/۱۳ و ۸۸۹/۸۹ و ۹۰۸/۹۱ نانومتر بود.

به‌منظور پردازش تصاویر فراطیفی به‌دست‌آمده، ابتدا فرایند پیش‌پردازش تصاویر انجام گرفت. در این مرحله، قسمت وسط تصاویر برش داده شد تا برای مرحله بعد، استفاده شوند. در مرحله دوم، با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) طول‌موج‌های کارا انتخاب شدند. از طریق محاسبه میانگین مؤلفه‌های اصلی اول (PC1) و دوم (PC2)، طول‌موج‌های مؤثر فرا مکعب انتخاب شدند. به این صورت که متغیرها نمودار دو متغیر PC1 و PC2 رسم شد و مقادیر پیک نمودارها به‌عنوان طول موج مؤثر تعیین شد. پس از آن، ویژگی‌های متفاوتی از این کانال‌های تصاویر مربوط به طول‌موج‌های انتخابی استخراج شد. ویژگی‌های استخراج‌شده، شامل میانگین، حداقل، حداکثر، میانه، واریانس و انحراف معیار بود [۲۳ و ۲۷-۲۸].

کاهش متغیرهای ورودی در عملکرد طبقه‌بندی درجه خلوص مختلف امری ضروری است. به همین دلیل، از میان تمام ویژگی‌های استخراج‌شده، چند ویژگی به‌عنوان ویژگی‌های کارا انتخاب و بقیه حذف شدند. از روش انتخاب ویژگی متوالی برای انتخاب ویژگی کارا استفاده شد [۲۹-۳۱]. با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) ویژگی‌های کارای انتخابی طبقه‌بندی شدند [۳۲-۳۴].

تشخیص درصدهای مختلف افزودنی در پودر فلفل سیاه با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان، بررسی و ارزیابی شدند. در روش ماشین بردار پشتیبان، از هسته گوسی استفاده شد. به این دلیل که داده‌ها مربوط به چندطبقه مختلف بودند، در تحقیق حاضر از دو راهبرد مختلف ماشین بردار پشتیبان، شامل یکی در برابر یکی و یکی در برابر همه استفاده شد. از داده‌های به‌دست‌آمده، ۸۰٪ برای آموزش مدل طبقه‌بند و ۲۰٪ باقی‌مانده برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت [۳۵-۳۷].



شکل (۴) مؤلفه‌های اول و دوم تصویر فراطیفی فلفل سیاه با افزودنی الف) آرد گندم، ب) کف دریا و ج) آرد نخود [۳۹].
Fig 4. The first and second components of the hyperspectral image of black pepper with a) wheat flour, b) sea foam, and c) chickpea flour [39].



۲.۳. ویژگی‌های کارا

همچنین طول موج مربوط به هر تصویر در این جدول آمده است. این ویژگی‌ها برای طبقه‌بندی مدنظر قرار گرفتند.

در جدول (۱) ویژگی‌های کارای نمونه‌های فلفل سیاه مخلوط با آرد گندم، آرد نخود، و پودر کف دریا آمده است.

جدول (۱) ویژگی‌های کارای طبقه‌های مختلف فلفل سیاه مخلوط با آرد گندم، آرد نخود، و پودر کف دریا.

Table 1. Efficient features of different classes of black pepper mixed with wheat flour, chickpea flour, and sea foam.

Wheat flour		Chickpea flour		Sea foam	
Feature	W*(nm)	Feature	W*(nm)	Feature	W*(nm)
Mean	598.03	Mean	618.69	Mean	606.29
Standard deviation	598.03	Median	618.69	Mean	643.49
Mean	605.46	Mean	734.45	Variance	643.49
Variance	605.46	Median	734.45	Mean	738.58
Mean	734.45	Maximum	774.13	Median	738.58
Median	734.45	Median	774.13	Variance	738.58
Variance	734.45	Mean	889.89	Mean	760.91
Mean	778.27	Median	889.89	Median	760.91
Mean	892.37	Mean	908.91	Mean	860.95
Median	892.37	Median	908.91	Mean	927.10
Variance	892.37				

۵٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که طبقه‌بند تمامی نمونه‌ها را در این طبقات به‌درستی تشخیص داده است. طبقه سوم مربوط به نمونه‌های با ۱۵٪ افزودنی آرد گندم است که از ۱۸ مورد، تنها یک مورد به‌اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. درنهایت، طبق ماتریس اغتشاش به‌دست‌آمده در این روش، تعداد ۸۹ نمونه از ۹۰ نمونه به‌درستی و یک مورد به‌اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند برابر ۹۸/۸۸٪ است.

۳.۳. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی

۱.۳.۳. آرد گندم

ماتریس اغتشاش مربوط به مدل طبقه‌بند، مبتنی بر روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی در شکل (۵) آورده شده است. طبقه اول، دوم، چهارم و پنجم به‌ترتیب مربوط به فلفل سیاه خالص (صفر درصد افزودنی)،

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	0	18	0	0	0	100%
3	0	1	17	0	0	94.44%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	100%	94.73%	100%	100%	100%	98.88%

شکل (۵) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی برای تشخیص افزودنی آرد گندم در فلفل سیاه.
Fig 5. Confusion matrix of support vector machine with one-to-one strategy to detect wheat flour in black pepper.

در شکل (۶) ماتریس اغتشاش مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه آمده است. طبقه اول تا پنجم به ترتیب مربوط به فلفل سیاه خالص (صفر درصد افزودنی)، ۵٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که طبقه‌بند

تمامی نمونه‌ها را این طبقات به درستی تشخیص داده است. در نهایت طبق ماتریس اغتشاش به دست آمده در این روش، تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند برابر ۱۰۰٪ است.

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	0	18	0	0	0	100%
3	0	0	18	0	0	100%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%

شکل (۶) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه برای تشخیص افزودنی آرد گندم در فلفل سیاه.
Fig 6. Confusion matrix of support vector machine with one-against-all strategy to detect wheat flour in black pepper.

۱۸ مورد، تنها یک مورد به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. طبقه چهارم و پنجم، به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند. در نهایت طبق ماتریس اغتشاش به دست آمده در این روش، ۸۹ نمونه از ۹۰ نمونه به درستی و یک مورد به اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند برابر ۹۸/۸۸٪ است.

۲.۳.۳. پودر کف دریا

ماتریس اغتشاش مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی در شکل (۷) آورده شده است. طبقه اول و دوم به ترتیب مربوط به فلفل سیاه خالص (صفر درصد افزودنی) و ۵٪ افزودنی کف دریا در فلفل سیاه است که طبقه‌بند تمامی نمونه‌ها را به درستی تشخیص داده است. طبقه سوم، مربوط به نمونه‌های ۱۵٪ افزودنی است که از

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	0	18	0	0	0	100%
3	0	1	17	0	0	94.44%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	100%	94.73%	100%	100%	100%	98.88%

شکل (۷) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی برای تشخیص افزودنی کف دریا در فلفل سیاه.

Fig 7. Perturbation matrix of support vector machine with one-to-one strategy to detect sea foam in black pepper.

تشخیص داده است. طبقه چهارم و پنجم، به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند. در نهایت طبق ماتریس اغتشاش به دست آمده در این روش، میان ۹۰ نمونه آزمایشگاهی طبقه‌بند، ۸۲ نمونه را به درستی و ۸ مورد را به اشتباه تشخیص داده است؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند، برابر ۹۱/۱۱٪ است.

در شکل (۸) ماتریس اغتشاش مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه آورده شده است. که در این ماتریس طبقه اول و دوم به ترتیب مربوط به فلفل سیاه خالص (صفر درصد افزودنی) و افزودنی ۵٪ است که طبقه‌بند تمامی نمونه‌ها را به درستی تشخیص داده است. طبقه سوم، فلفل سیاه با افزودنی ۱۵٪ کف دریا است که ۱۰ نمونه را به درستی تشخیص داده است. ۲ نمونه را به عنوان ۳۰٪ افزودنی و ۶ نمونه را به عنوان ۵٪ افزودنی

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	0	18	0	0	0	100%
3	0	6	10	2	0	55.55%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	100%	75%	100%	90%	100%	91.11%

شکل (۸) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه، برای تشخیص افزودنی کف دریا در فلفل سیاه.
Fig 8. Perturbation matrix of support vector machine with one-against-all strategy to detect sea foam in black pepper.

مربوط به نمونه‌های ۱۵٪ افزودنی است که از ۱۸ مورد، تنها یک مورد به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. طبقه چهارم و پنجم، به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند. در نهایت طبق ماتریس اغتشاش به دست آمده در این روش، تعداد ۸۶ نمونه از ۹۰ نمونه به درستی و ۴ مورد به اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند برابر ۹۵/۵۵٪ است.

۳.۳.۳. آرد نخود

شکل (۹) ماتریس اغتشاش مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی است. طبقه اول مربوط به فلفل سیاه خالص است که طبقه‌بند تمامی نمونه‌ها را به درستی تشخیص داده است. طبقه دوم، فلفل سیاه با افزودنی ۵٪ آرد نخود است که ۱۵ نمونه را به درستی و ۳ نمونه را به عنوان ۵٪ افزودنی تشخیص داده است. طبقه سوم

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	3	15	0	0	0	83.33%
3	0	0	17	1	0	94.44%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	85.71%	100%	100%	94.74%	100%	95.55%

شکل (۹) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر یکی برای تشخیص افزودنی آرد نخود در فلفل سیاه.
Fig 9. Confusion matrix support vector machine with one-to-one strategy to detect chickpea flour in black pepper.

از ۱۸ مورد، تنها یک مورد به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. طبقه چهارم و پنجم، به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ افزودنی است که تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند. در نهایت طبق ماتریس اغتشاش به دست آمده در این روش، تعداد ۸۴ نمونه از ۹۰ نمونه، به درستی و ۶ مورد به اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ بنابراین نرخ طبقه‌بندی صحیح این مدل طبقه‌بند برابر ۹۳/۳۳٪ است.

ماتریس اغتشاش مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه در شکل (۱۰) آورده شده است. طبقه اول مربوط به فلفل سیاه خالص است که طبقه‌بند تمامی نمونه‌ها را به درستی تشخیص داده است. طبقه دوم، فلفل سیاه با افزودنی ۵٪ آرد نخود است که ۱۳ نمونه را به درستی تشخیص داده است؛ ۲ نمونه را به عنوان ۱۵٪ افزودنی و ۳ نمونه را به عنوان ۵٪ افزودنی تشخیص داده است. طبقه سوم مربوط به نمونه‌های ۱۵٪ افزودنی است که

	1	2	3	4	5	
1	18	0	0	0	0	100%
2	3	13	2	0	0	72.22%
3	0	0	17	1	0	94.44%
4	0	0	0	18	0	100%
5	0	0	0	0	18	100%
	85.71%	100%	89.47%	94.73%	100%	93.33%

شکل (۱۰) ماتریس اغتشاش ماشین بردار پشتیبان با راهبرد یکی در برابر همه برای تشخیص افزودنی آرد نخود در فلفل سیاه.

Fig 10. Confusion matrix of support vector machine with one-against-all strategy to detect chickpea flour in black pepper.

سطح از افزودنی‌های آرد گندم، کف دریا و آرد نخود در فلفل سیاه، به روش ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شد. برای تشخیص افزودنی در فلفل سیاه، دقت طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان با دو راهبرد، یکی در برابر یکی و یکی در برابر همه محاسبه گردید. نرخ طبقه‌بندی صحیح مدل طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان، با راهبرد یکی در برابر یکی، در تشخیص افزودنی آرد گندم، کف دریا و آرد نخود در دارچین، به ترتیب برابر ۹۸/۸۸٪، ۹۸/۸۸٪ و ۹۵/۵۵٪ دقت آن با راهبرد، یکی در برابر همه، به ترتیب برابر ۱۰۰٪، ۹۱/۱۱٪ و ۹۳/۳۳٪ بود. روش پیشنهادی علاوه بر دقت تشخیص بالا، قابل اطمینان بودن، دارای مزایای متفاوتی نسبت به روش‌های مبتنی بر آزمایشگاه از جمله غیرمخرب، سریع، ساده و کم‌هزینه است. روش پیشنهادی این تحقیق، می‌تواند در آینده برای تشخیص انواع افزودنی‌های فلفل سیاه به کار گرفته شود.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج مطالعات قبلی قابل مقایسه است. [۳۸] در تحقیقی به بررسی برآورد سطح زیرکشت گندم دیم با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲ پرداختند. از طبقه‌بندی نظارت‌شده و از دو روش ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال برای استخراج اطلاعات استفاده شد. با مقایسه دو روش، مناسب‌ترین روش انتخاب و پیشنهاد شد. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ماتریس خطا استفاده شد. دقت کلی در روش ماشین بردار پشتیبان ۸۹٪ با ضریب کاپای ۰/۸ و در روش حداکثر احتمال ۸۸٪ با ضریب کاپای ۰/۷۹ به دست آمد. نتایج ارزیابی نشان داد که روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان نسبت به حداکثر احتمال، از دقت بالاتری برخوردار است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از روش پردازش تصویر فراطیفی، درجه خلوص فلفل سیاه مشخص و بررسی شد. در این ارزیابی، پنج



تشکر و قدردانی

این پژوهش، با حمایت دانشگاه بوعلی سینای همدان و همچنین با فراهم‌شدن شرایط اجرایی لازم از سوی دانشگاه ایلام به نتیجه رسید؛ ما قدردان این توجه و همکاری هستیم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] Peter, K.V., (Ed.). (2012). Handbook of herbs and spices, Elsevier. 145-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801773-9.00011-X>.
- [2] Aggarwal, B.B., & Kunnumakkara, A.B. (2009). Molecular Targets and Therapeutic Uses of Spices: Modern Uses for Ancient Medicine; *World Scientific*: Singapore.
- [3] Roman, S., Sanchez-Siles, L.M., & Siegrist, M. (2017). The importance of food naturalness for consumers. Results of a systematic review. *Trends In F Sci & Techno*, 67, 44-57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.010>.
- [4] Omidbeigi, R., (2014). production and processing of medicinal plants, Astan Quds Razavi Publications [In Persian]
- [5] Granata, G., Stracquadiano, S., Leonardi, M., Napoli, E., & Consoli, G.M.L. (2018). Essential oils encapsulated in polymer-based nanocapsules as potential candidates for application in food preservation. *F. Chemi.* 269: 286-292. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.140>.
- [6] Rawat, S. (2015). Food Spoilage: Microorganisms and their prevention. *Asian J of Plant Sci & Research* 5: 47-56.
- [7] Gliszczyńska-Świąło, A. & Chmielewski, J. (2017). Electronic nose as a tool for monitoring the authenticity of food, *Food Analytical Methods*, 10(6), 1800-1816. DOI 10.1007/s12161-016-0739-4.
- [8] Banerjee, D., Chowdhary, S., Chakraborty, S. & Bhattacharyya, R. (2017). Recent Advances in Detection of Food Adulteration. *Academic Press*, 145-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801773-9.00011-X>.
- [9] Li, Ch., Xu, F., Cao, Ch., Shang, M.Y., Zhang, C.Y., Yu, J., Liu, G.X., Wang, X. & Cai, SH.C. (2013). Comparative analysis of two species of Asari Radix et Rhizoma by electronic nose, headspace GC-MS and chemometrics, *J of Pharma & Bio Analysis*, 85, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.07.034>
- [10] Shafiqul Islam, A.K.M., Ismail, Z., Saad, B., Othman, A.R., Ahmad, M.N. & Shakaff, A.Y.Md. (2006). Correlation studies between electronic nose response and headspace volatiles of Eurycoma longifolia extracts. *Sensors and Actuators B*, 120, 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.02.020>
- [11] Temiz, H., & Ulas, B. (2021). A Review of recent studies employing hyperspectral imaging for the determination of food adulteration. *Photochem.* 1, 125-146. <https://doi.org/10.3390/photochem1020008>.
- [12] Ciftci, M., Simsek, U.G., Yuce, A., Yilmaz, O., & Dalkilic, B. (2010). Effects of dietary antibiotic and cinnamon oil supplementation on antioxidant enzyme activities, cholesterol levels and fatty acid compositions of serum and meat in broiler chickens. *Acta Veterinaria Brno.* 79(1), 33-40. <https://doi.org/10.2754/avb201079010033>.
- [13] Dhanya, K., Kizhakkayil, J., Syamkumar, S., & Sasikumar, B. (2007). Isolation and amplification of genomic DNA from recalcitrant dried berries of

- black pepper (*Piper nigrum* L.). *A medicinal spice*. 7: 165-168 .<https://doi.org/10.1007/s12033-007-0044-y>
- [14] Azarmdel, H., Jahanbakhshi, A., Mohtasebi, S.S., & Muñoz, A.R. (2020). Evaluation of image processing technique as an expert system in mulberry fruit grading based on ripeness level using artificial neural networks (ANNs) and support vector machine (SVM), *Postharvest Biol. Technol.* 166, 111201.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111201>
- [15] Gowen, A.A., O'Donnell, C.P., Cullen, P.J., Downey, G., & Frias, J.M. (2017). Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends Food Sci. Technol.* 18, 590–598.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.06.001>
- [16] Soni, A., Dixit, Y., Reis, M.M., & Brightwell, G. (2022). Hyperspectral imaging and machine learning in food microbiology: Developments and challenges in detection of bacterial, fungal, and viral contaminants. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 21, 3717–3745.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12983>
- [17] Wu, X.Y., Zhu, S.P., Huang, H., & Xu, D. (2017). Quantitative identification of adulterated sichuan pepper powder by near-infrared spectroscopy coupled with chemometrics. *J. Food Qual.* 5019816.
<https://doi.org/10.1155/2017/5019816>
- [18] Khan, M.H., Saleem, Z., Ahmad, M., Sohaib, A., Ayaz, H., & Mazzara, M. (2020). Hyperspectral imaging for color adulteration detection in red chili. *Appl. Sci.* 10, 5955.
<https://doi.org/10.3390/app10175955>
- [19] Kumar, A., Bharti, V., Kumar, V., Kumar, U., & Meena, P.D. (2016). Hyperspectral imaging: A potential tool for monitoring crop infestation, crop yield and macronutrient analysis, with special emphasis to Oilseed Brassica. *Journal of Oilseed Brassica*, 7(2), 113-12.
- [20] Vejarano, R., Siche, R., & Tesfaye, w. (2017). Evaluation of biological contaminants in foods by hyperspectral imaging: A review. *International Journal of Food Properties.* 20(2), 1264-1297.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1338729>
- [21] Lu, B., Dao, P.D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, 12, 2659.
<https://doi.org/10.3390/rs12162659>
- [22] Kheiralipour, K., Singh, C. B., & Jayas, D. S. (2023). Applications of Visible, Thermal, and Hyperspectral Imaging Techniques in the Assessment of Fruits and Vegetables. In *Image Processing: Advances in Applications and Research*. Edited by Jayas, D.S. New York, USA: *Nova Science Publishers*.
- [23] Singh, C.B. (2009). Detection of insect and fungal damage and incidence of sprouting in stored wheat using near-infrared hyperspectral and digital color imaging. Ph.D. Dissertation. University of Manitoba, Winnipeg, Canada.
- [24] Gomez-Sanchis, J., Gomez-Chova, L., Aleixos, N., Camps-Valls, G., Montesinos-Herrero, C., Molto, E., & Blasco, J. (2008). Hyperspectral system for early detection of rotteness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins. *J of Food Eng.* 89, 80-86.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.009>
- [25] Siripatrawan, U., & Makino, Y. (2015). Monitoring fungal growth on brown rice grains using rapid and nondestructive hyperspectral

- imaging. *Inter J of Food Micro*, 199, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.01.001>.
- [26] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Javan-Nikkhah, M., Jayas, D. S. and Siliveru K. (2015). 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. <https://doi.org/10.3920/QAS2015.0606>.
- [27] Kheiralipour, K. (2012). Implementation and construction of a system for detecting fungal infection in pistachio kernel based on thermal imaging (TI) and image processing technology. Ph.D. Dissertation, University of Tehran, Karaj, Iran. [In persian]
- [28] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., & Javan-Nikkhah, M. (2014). Classifying healthy and fungal infected-pistachio kernel by thermal imaging technology. *International Journal of Food Properties.* 18 (1), 93-99. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.717155>.
- [29] Azadnia, R., & Kheiralipour, K. (2021). Recognition of leaves of different medicinal plant species using a robust image processing algorithm and artificial neural networks classifier. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants.* 100327. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2021.100327>.
- [30] Hosainpour, A., Kheiralipour, K., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2022). Quality Assessment of Dried White Mulberry (*Morus alba* L.) Using Machine Vision. *Horticulturae*, 8(11), 1011. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111011>.
- [31] Khazaei, Y., Kheiralipour, K., Hosainpour, A., Javadikia, H., & Paliwal, J. (2022). Development of a novel image analysis and classification algorithms to separate tubers from clods and stones. *Potato Research*, 65(1): 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09528-7>.
- [32] Kheiralipour, K., & Marzbani, F. (2016). Pomegranate quality sorting by image processing and artificial neural network. 10th Iranian National Congress on AGR Machi Eng (Biosystems) and Mechanization. 29-31 August, Mashhad, Iran.
- [33] Farokhzad, S., Modarres Motlagh, A., Ahmadimoghadam, P., Jalali Honarmand, S., & Khaieralipour, K. (2017). Fungal infection in potato tuber using thermal imaging. *Iranian J of Bio Eng.* 48(3):243-253. 10.22059/ijbse.2017.212753.664821
- [34] Azadnia, R., & Kheiralipour, K. (2022). Evaluation of hawthorns maturity level by developing an automated machine learning-based algorithm. *Ecological Informatics.* 71, 101804. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101804>. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101804>.
- [35] Moosavian, A. (2012). Fault Diagnosis and Classification of Journal Bearings by Using Support Vector Machine, M. Sc. dissertation, University of Tehran, Karaj.
- [36] Kheiralipour, K., & Pormah, A. (2017). Introducing new shape features for classification of cucumber fruit based on image processing technique and artificial neural networks. *J. of Food. Pro. Eng.* 40(6), e12558. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12558>.
- [37] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Javan-Nikkhah, M., Jayas, D.S., Siliveru, K., & Malihipour, A. (2021). Processing the hyperspectral images for detecting infection of pistachio kernel by R5 and KK11 isolates of *Aspergillus flavus* fungus. *Iran. J. Biosyst. Eng* 52 (1), 13-25. <https://dx.doi.org/10.22059/ijbse.2020.299712.665293>.

- [38] Mousavi, S., A. Abbaszadeh Tehrani, N. & Jan Alipour, M. (2019). Estimation of the area under dryland wheat cultivation using Sentinel-2 satellite images. *Envir Rese & Tech*, 2019, 5 (7), 77-90. <https://doi.org/10.3390/rs12061024>.
- [39] Nargesi, M. H. (2024). Detection of fraud in black pepper, red pepper, and cinnamon powder using hyperspectral imaging and artificial neural network. Ph.D. Dissertation, University of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
- [40] Nobari Moghaddam, H., Tamiji, Z., Akbari Lakeh, M., Khoshayand, M. R., & Haji Mahmoodi, M. (2022). Multivariate analysis of food fraud: A review of NIR based instruments in tandem with chemometrics. *J. of F. Compo. & Anal*, 107 (December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104343>.
- [41] Malavi, D., Nikkhah, A., Alighaleh, P., Einafshar, S., Raes, K., & Haute, S. V. (2024). Detection of saffron adulteration with *Crocus sativus* style using NIR-hyperspectral imaging and chemometrics. *Food Control*. 157, 110189. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110189>.
- [42] Deng, S., Xu, Y., Li, L., Li, X., & He, Y. (2013). A feature-selection algorithm based on Support Vector Machine-Multiclass for hyperspectral visible spectral analysis. *J. of Food Eng*, 119(1), 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.024>.
- [43] Chen, Q., Zhao, J., Fang, C. H., & Wang, D. (2007). Feasibility study on identification of green, black and Oolong teas using near-infrared reflectance spectroscopy based on support vector machine (SVM). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 66(3), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.03.038>.
- [44] Zeng, T., Matsunaga, T., & Shirai, T. (2019). Generalization of parameter selection of SVM and LS-SVM for regression. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1(2), 745–755. <https://doi.org/10.3390/make1020043>.
- [45] 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, 3471. <https://doi.org/10.3390/foods12183471>.
- [46] Kheiralipour, K., Chelladurai, V., & Jayas, D.S. (2023a). Imaging Systems and Image Processing Techniques. In *Image Processing: Advances in Applications and Research*. Edited by Jayas, D.S. New York, USA: Nova Science Publishers.
- [47] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., & Rafiee, S. (2018). *Thermal Imaging, Principles, Methods and Applications*. 1st Ed. Ilam University Publication, Ilam, Iran.
- [48] Kheiralipour, K., & Jayas D.S. (2023b). Applications of near infrared hyperspectral imaging in agriculture, natural resources, and food in Iran. 15th National and 1st International Congress of Mechanics of Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization. Karaj, Iran.
- [49] Kheiralipour, K., & Jayas, D.S. (2023a). Advances in image processing applications for assessing leafy materials. *International Journal of Tropical Agriculture*. 41(1-2), 31-47.
- [50] Kheiralipour, K., Singh, C. B., & Jayas, D. S. (2023b). Applications of Visible, Thermal, and Hyperspectral Imaging Techniques in the Assessment of Fruits and Vegetables. In *Image Processing: Advances in Applications and Research*. Edited by Jayas, D.S. New York, USA: Nova Science Publishers. [In persian]
- [51] Salam, S., & Kheiralipour, K. (2022). Development and evaluation of chickpea

classification system based on visible image processing technology and artificial neural network. *Innovative Food Technologies*. 9(2), 181-163. 10.22104/jift.2021.5173.2063.

[52] Kheiralipour, K., & Jayas, D.S. (2023c). Image Processing for the Quality Assessment of Flour and Flour-Based Baked Products. In *Image Processing: Advances in Applications and Research*. Edited by Jayas, D.S. New York, USA: Nova Science Publishers.

[53] Kheiralipour, K., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2022). Development of an Intelligent Imaging System for Ripeness Determination of Wild Pistachios. *Sensors*. 22(19), 7134. <https://doi.org/10.3390/s22197134>.

[54] Salam, S., Kheiralipour, K., & Jian, F. (2022). Detection of unripe kernels and foreign materials in chickpea mixtures using image processing. *Agriculture*, 12(7), 995. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070995>.

[55] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Javan-Nikkhah, M., & Jayas, D.S. (2013). Development of a new threshold-based classification model for analyzing thermal imaging data to detect fungal infection of pistachio kernel. *Agricultural Research*, 2, 127-131.

<https://doi.org/10.1007/s40003-013-0057-7>.

[56] Farokhzad, S., Modares Motlagh, A., Ahmadi Moghadam, P., Jalali Honarmand, S., & Kheiralipour, K. (2020). Application of infrared thermal imaging technique and discriminant analysis methods for non-destructive identification of fungal infection of potato tubers. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 14(1): 88-94. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00270-w>.

[57] Arjomandi, H.R., Kheiralipour, K., & Amarloei, A. (2022). Estimation of dust concentration by a novel machine vision system. *Scientific Reports*, 12(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18036-8>.