



Authentication of Iranian Saffron Types by Fourier Transform Spectroscopy and Chemometric Methods

Amir Kazemi^{1*} and Asghar Mahmoudi^{2*}

Article type:

Research Article

Article history:

Submitted: 21 December 2025

Revised: 4 May 2026

Accepted: 23 May 2026

Available Online: 24 May 2026

How to cite this article:

Kazemi, A., and Asghar Mahmoudi, A. (2026). Authentication of Iranian Saffron Types by Fourier Transform Spectroscopy and Chemometric Methods. *Saffron Agronomy & Technology*, 13(4), 451-462.

<https://doi.org/10.22048/jsat.2026.565009.1582>

Abstract

Saffron is a spice that is produced from the dried stigmas of the *Crocus sativus* L. flower and is the most expensive spice in the world. As a result, this product is frequently targeted for adulteration. In the Iranian local market, saffron is classified into three main types based on the position of the stigma in the dried threads: Sargol, Negin, and Poshal. These types differ in terms of quality and cost. Therefore, accurate identification of saffron types is important. In the present study, Fourier Transform Mid-Infrared (FT-MIR) spectroscopy combined with chemometric methods was employed to classify different types of Iranian saffron. Various preprocessing techniques were applied to correct the spectral data. Principal Component Analysis (PCA) was used as an unsupervised model, and Linear Discriminant Analysis (LDA) with linear and quadratic kernels was applied as a supervised model. The best model used SG + D2 + MSC preprocessing and a linear kernel with the LDA model, achieving 88.88% accuracy in classifying the three saffron types. The acceptable result proves the effectiveness of this method for the non-destructive identification of Iranian saffron types.

Keywords: Fourier Transform Mid-Infrared, Linear Discriminant Analysis, Non-destructive, Principal Component Analysis

1 - PhD student, Department of biosystem engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2 - Professor, Department of biosystem engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran



Corresponding author email: Amirkazemi422@gmail.com and a_mahmoudi@tabrizu.ac.ir

<https://doi.org/10.22048/jsat.2026.565009.1582>

مقاله پژوهشی

مقایسه انواع زعفران در بازار ایران به روش طیف‌سنجی تبدیل فوری و روش‌های شیمی آماری

امیر کاظمی^{۱*} و اصغر محمودی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۳۰ آذر ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲ خرداد ۱۴۰۵

کاظمی، ا.، و محمودی، ا. (۱۴۰۴). مقایسه انواع زعفران در بازار ایران به روش طیف‌سنجی تبدیل فوری و روش‌های شیمی آماری. *زراعت و فناوری زعفران*، ۱۳(۴)، ۴۶۲-۴۵۱.

چکیده

زعفران ادویه‌ای است که از کلاله‌های گل *Crocus sativus* L پس از خشک شدن تولید می‌شود و گران‌ترین ادویه جهان است. بنابراین این محصول هدف تقلب‌های مکرر و برچسب‌گذاری‌های نادرست است. در بازار محلی ایران زعفران بر اساس محل سرزنی در کلاله به سه نوع عمده سرگل، نگین و پوشال تقسیم می‌شود که خواص کیفی و قیمت آنها بر اساس نوع آنها متفاوت است. بنابراین تشخیص نوع زعفران از لحاظ کیفی و اقتصادی حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر، ترکیب طیف‌سنجی تبدیل فوری FT-MIR و روش‌های شیمی آماری برای طبقه‌بندی انواع زعفران ایرانی به کار گرفته شدند. روش‌های پیش‌پردازش مختلف برای اصلاح داده‌های طیفی استفاده شدند و مدل تحلیل مولفه اصلی PCA به عنوان مدل بدون نظارت و مدل آنالیز تشخیصی خطی (LDA) با دو کرنل خطی و درجه دو به کار گرفته شدند. بهترین نتیجه با پیش‌پردازش $SG + D2 + MSC$ و کرنل خطی مدل LDA با دقت پیش‌بینی ۸۸/۸٪ برای طبقه سه نوع زعفران به دست آمد. نتیجه قابل قبول بدست آمده کارایی این روش را برای تشخیص غیرمخرب انواع زعفران ایرانی اثبات می‌کند.

کلمات کلیدی: آنالیز تشخیصی خطی، تحلیل مولفه اصلی، ترکیب طیف‌سنجی تبدیل فوری، غیر مخرب

۱ - دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲ - استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* - نویسنده مسئول: Amirkazemi422@gmail.com و a_mahmoudi@tabrizu.ac.ir

مقدمه

زعفران که به طلای سرخ نیز معروف است از کالاهای خشک *Crocus sativus* L. بدست می‌آید و به دلیل عطر و رنگ مناسبی که در انواع غذاها ایجاد می‌کند مصرف جهانی دارد. به دلیل محدودیت تولید زعفران و همچنین عملیات دستی سخت برای برداشت آن یکی از گران قیمت‌ترین محصولات کشاورزی در سراسر جهان است. به طوریکه حدود ۱۵۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰ گل زعفران برای تولید تنها ۱ کیلوگرم زعفران پودری نیاز است (Dai et al., 2020).

مطالعات بالینی نشان داده است که زعفران اختلال قدرت شناخت را در بیماری‌های عصبی مانند آلزایمر و پارکینسون بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، زعفران با تعدیل انواع عوامل خطر مانند فشار خون بالا، چربی خون، استرس اکسیداتیو واکنش محافظتی در برابر بیماری‌های قلبی عروقی نشان می‌دهد. ایران با دارا بودن حدود ۱۲۳ هزار هکتار سطح زیر کشت در سال ۱۴۰۲ و توان تولید بیش از ۴۵۰ تا ۴۷۰ تن زعفران در سال، بزرگترین و مهم‌ترین تولیدکننده زعفران در جهان است. زعفران در بازار محلی ایران عمدتاً به سه نوع سرگل، نگین و پوشال تقسیم می‌گردد. طبقه‌بندی انواع زعفران بستگی به محل حذف قسمت قرمز از کاله دارد (Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020; Shahdadi et al., 2016). برای تهیه پوشال، کاله (بخش قسمت هوایی مادگی) را با مقدار کمی خامه (قسمتی از مادگی بین کاله و تخمدان) از انتهای ۳ رشته جدا کرده و سپس خشک می‌کنند. نگین فقط قرمز رنگ است و سه رشته جدا شده و به صورت جداگانه جمع‌آوری و سپس خشک می‌شوند. سرگل کاملاً قرمز است و در انتهای آن هیچ بخش خامه وجود ندارد. تفاوت سرگل و نگین این است که در سرگل

کاله‌ها شکسته هستند ولی در نگین بیشتر کاله‌ها کامل و بدون شکستگی هستند (Atefi et al., 2013). بنابراین سرگل کوتاهترین بخش و پس از آن طول میانی نگین و سپس بلندتر که پوشال است.

طبقه‌بندی انواع زعفران ایرانی هم از لحاظ کیفی و هم از لحاظ اقتصادی مهم است. خواص کیفی انواع زعفران متفاوت است. زعفران نگین و سرگل بدلیل قدرت رنگ‌دهی و کیفیت فوق العاده‌اش قیمت بالاتری دارند و برای صادرات و بازارهای بین‌المللی مناسب است. زعفران پوشال که بخشی از خامه را دارد کیفیت کمتری دارد و اقتصادی‌تر است و اغلب برای مصارف خانگی و صنعتی انتخاب می‌شود.

در تشخیص سنتی این نوع زعفران‌ها که توسط کارشناسان و افراد خبره صورت می‌گیرد، تفاوت در تشخیص‌ها و قضاوت‌ها منجر به برخی ناهماهنگی‌ها و خطاها می‌شود. به علاوه استفاده از روش‌هایی مانند روش‌های کروماتوگرافی دارای محدودیت‌هایی مانند مخرب بودن، زمان‌بر بودن، نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و پرسنل ماهر برای آزمایش می‌باشد. از طرف دیگر روش‌های غیرمخرب مانند طیف‌سنجی نیاز به روش‌های پیچیده آماده‌سازی نمونه ندارند. به علاوه روش‌های طیف‌سنجی به دلیل سادگی و سرعت بالا توجه بیشتری در آنالیز مواد غذایی به خود جلب کرده‌اند.

طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز ۱ (FTIR) یکی از رایج‌ترین روش‌های طیف‌سنجی است که می‌تواند برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی زعفران مورد استفاده قرار بگیرد. این روش بر این اساس است که گروه‌های متفاوت طول‌موج‌های خاصی از نور را جذب می‌کنند و این امر منجر به حرکات لرزشی خاصی مانند حرکات خمشی و کششی می‌شوند که در پیک‌های خاصی از طیف ظاهر می‌شوند. این پیک‌های طیفی متناسب

سه نوع زعفران (سرگل، نگین و پوشال) به صورت کلاله از یک مزرعه زعفران در شهرستان بناب استان آذربایجان شرقی خریداری شد. آنها بوسیله هاون آزمایشگاهی پودر شدند و برای یکنواختی در اندازه ذرات از مش با اندازه ۴۲۰ میکرومتر عبور داده شدند. شکل ۱، تصویر ارقام مختلف زعفران پودری را نشان می‌دهد. شباهت ظاهری این ارقام برخی سودجویان را به تقلب یا برچسب‌زنی اشتباه ارقام ارزان‌تر به جای ارقام گران‌تر ترغیب می‌کند. سپس نمونه‌های پودری به ظروف پتری ریخته شدند و برای داده‌برداری به آزمایشگاه منتقل شدند. تعداد ۱۲۰ نمونه آنالیز شدند (۴۰ نمونه برای هر نوع). داده‌های طیفی در حالت جذبی و در محدوده $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ و با رزولشن 1 cm^{-1} و با طیف‌سنج FTIR (TENSOR 27, Bruker, Germany) بدست آمدند. سپس داده‌های طیفی بدست آمده به نرم‌افزار اکسل منتقل شده و آماده‌سازی شدند. در نهایت داده‌های طیفی به نرم‌افزار Unscrambler (Camo software, Oslo, Norway) انتقال داده شدند.

پیش‌پردازش داده‌های طیفی

پیش از مدلسازی، پیش‌پردازش داده‌های طیفی برای حذف طیف‌های نامطلوب که دارای اطلاعات ناخواسته و اضافی هستند امری ضروری است. با به کارگیری تکنیک‌های پیش‌پردازش از جمله تصحیح پراکندگی و مشتق طیفی فرایند مدلسازی آسانتر خواهد شد. روش‌های تصحیح پراکندگی برای اصلاح اثرات پراکندگی در داده‌ها و مشتق‌های طیفی برای تصحیح همپوشانی قله‌ها و انحراف خط پایه به کار می‌روند (Kazemi et al., 2023). در این پژوهش برای هموارسازی طیف‌ها از روش هموارسازی ساویتزی-گلای (Savitzky-golay, SG) با اندازه پنجره ۱۵ و درجه چندجمله‌ای ۲ استفاده شد. برای حذف اثرات

است با گروه‌های عاملی حاضر در نمونه که منجر به تشخیص و تعیین آن نمونه می‌شود. روش طیف‌سنجی تبدیل فوریه در تحقیقات مختلفی برای بررسی خصوصیات کیفی و شیمیایی محصولات مختلف اعم از زعفران به کار گرفته شده. برای مثال در یک پژوهش که توسط (Petrakis & Polissiou, 2017) انجام شد، از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز بازتابی پراکنده برای شناسایی تقلبات گل‌های بودلیا، همیشه بهار، گاردنیا، گلرنگ، پرچم‌ها و زردچوبه در زعفران استفاده شد. آن‌ها با استفاده از روش تحلیل تفکیکی حداقل مربعات جزئی (PLS-DA) توانستند نمونه‌های تقلبی (با نسبت وزنی ۵ تا ۲۰ درصد) را از نمونه‌های خالص با دقت ۹۹٪ طبقه‌بندی کنند. (Foschi et al., 2022) در پژوهشی کارایی روش FTIR-ATR را همراه با مدل PLS-DA برای طبقه‌بندی زعفران تازه از زعفران کهنه با حساسیت ۱۰۰٪ نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر (Malavi et al., 2024) از تصویربرداری فراطیفی مادون قرمز نزدیک (NIR-HSI) همراه با مدل‌های کمومتریکس برای تشخیص کمی و کیفی تقلب زعفران استفاده کردند. در این تحقیق مدل‌های طبقه‌بندی به کار برده شده اعم از SVM, LDA, MLP و PLS-DA دقت بالایی در حدود ۹۵/۶-۱۰۰٪ بدست آوردند که کارایی این روش را به عنوان روشی سریع و غیرمخرب برای اصالت‌سنجی زعفران تایید می‌کند.

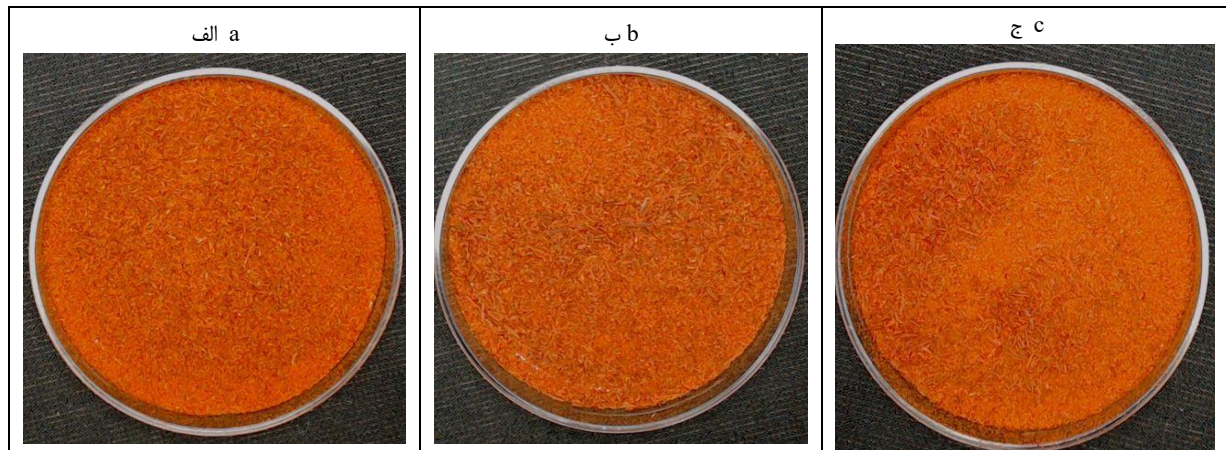
اما تا جایی که می‌دانیم بررسی قابلیت طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز همراه با مدل‌های بدون نظارت (PCA) و با نظارت (LDA) برای اصالت‌سنجی انواع زعفران ایرانی شامل نگین، سرگل و پوشال انجام نگرفته است. هدف تحقیق حاضر بررسی طبقه‌بندی انواع زعفران ایرانی با استفاده از روش طیف‌سنجی FT-IR همراه با مدل‌های PCA و LDA است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه و حصول داده

مختلف پیش‌پردازش برای بررسی اثرات آنها در نتایج مدل‌های طبقه‌بندی نیز به کار گرفته شد.

پراکندگی، روش تصحیح پراکندگی ضربی^۱ (MSC) و برای حذف انحرافات خط پایه و افزایش تفاوت بین طیف‌ها از مشتق اول (D1) استفاده شد. لازم به ذکر است ترکیب روش‌های



شکل ۱- انواع زعفران ایرانی (الف نگین ب) پوشال ج) سرگل
Figure 1- Iranian saffron types a) Negin, b) Pushal, c) Sargol.

مدلسازی (Elmas et al., 2019; Severcan et al., 2012). عملکرد مدل LDA به عنوان یک مدل طبقه‌بندی با نظارت بر اساس بهینه‌سازی تمایز واریانس درون کلاسی از طریق کاهش ابعاد متغیرها در ماتریس داده‌ها است (Pan et al., 2014). مدلسازی LDA شامل ۳ مرحله است: مرحله اول محاسبه تولنایی طبقه‌بندی میان کلاس‌های مختلف است (یعنی فاصله بین میانگین کلاس‌های گوناگون). مرحله دوم تعیین واریانس درون کلاسی از طریق محاسبه فاصله میانگین هر کلاس با نمونه‌های آن است. مرحله سوم ایجاد فضایی با ابعاد کمتر بر پایه بیشینه‌سازی تفاوت بین کلاسی و کمینه‌سازی واریانس درون کلاسی است (Tharwat et al., 2017). مدل LDA قادر است علاوه بر حالت خطی، داده‌های غیرخطی را نیز با استفاده از تابع هسته‌ای درجه دوم^۵ تفکیک کند. تابع هسته‌ای دوم زمانی مناسب است که هر کلاس شامل متغیرهایی در جهت‌های

مدلسازی

برای بررسی طبقه‌بندی انواع زعفران و همچنین بررسی اثرات روش‌های مختلف پیش‌پردازش، مدل تحلیل مولفه‌های اساسی^۲ (PCA) به عنوان مدل بدون نظارت و مدل آنالیز تشخیصی خطی^۳ (LDA) به عنوان مدل با نظارت به کار برده شدند. مدل PCA روشی کاربردی برای کاهش ابعاد متغیرهای ورودی است. این روش کموتریکس با انتخاب متغیرهایی که بیشترین واریانس را دارند مجموعه داده‌ای کوچکتر ایجاد می‌کند. مجموعه داده‌های بدست آمده اجزای اساسی (PC) نامیده می‌شوند که برای بررسی و نمایش پراکندگی داده‌ها در نمودارهای پراکندگی^۴ به کار می‌روند. واریانس داده‌ها از مولفه‌های اساسی اولیه به مولفه‌های بعدی کاهش می‌یابد. مدل PCA معمولاً پیش از سایر مدل‌ها به کار گرفته می‌شود تا پتانسیل خوشه‌بندی داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد (Karuk

4- Score plot
5- Quadratic kernel function

1- Multiplicative Scatter Correction
2- Principal Component Analysis
3- Linear Discriminant Analysis

ترکیبات شیمیایی ذاتی در سه کلاس زعفران (نگین، سرگل و پوشال) هستند. تفاوت اصلی این دسته‌بندی‌ها در میزان وجود بخش خامه و میزان خالص بودن کلاله قرمز است. این تفاوت‌های مورفولوژیکی بر میزان جذب طیفی تأثیر می‌گذارند. کلاله قرمز زعفران حاوی رنگدانه اصلی یعنی کروستین است. زعفران نگین و سرگل به دلیل خلوص بالای کلاله، غلظت کروستین بالایی دارند. در نتیجه در برخی طول موج‌ها بدلیل جذب کروستین میزان عبور کمتر است. به علاوه، به دلیل بافت فیبری خامه در زعفران پوشال، رطوبت آن با دو نوع دیگر متفاوت است. باند جذب گسترده در حدود 3300 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) پیوندی و آزاد است، در حالیکه پیک‌ها در محدوده 2854 cm^{-1} و 2924 به ترتیب به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن پیوندهای C-H مربوط می‌شوند. قله جذب در 1578 cm^{-1} به ارتعاشات C-O در استرهای مزدوج نسبت داده می‌شود و همچنین شامل مشارکت‌هایی از ارتعاشات آمید II و کششی C=C آروماتیک است. باند در 1020 cm^{-1} مربوط به پیوندهای گلیکوزیدی C-O-C در الیگوساکاریدها و نیز به ارتعاشات خمشی مشخصه قندها نسبت داده می‌شود (Foschi et al., 2022).

متفاوت باشد. در تحقیق حاضر هر دو کرنل خطی و درجه دو به کار برده شدند. عملکرد مدل طبقه‌بندی برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های حساسیت، اختصاصیت و نرخ طبقه‌بندی صحیح (CCR) ارزیابی می‌شود. این پارامترها از ماتریس اغتشاش بدست می‌آیند. معادلات محاسبه هر پارامتر در فرمول‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است (Kazemi et al., 2023):

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (1)$$

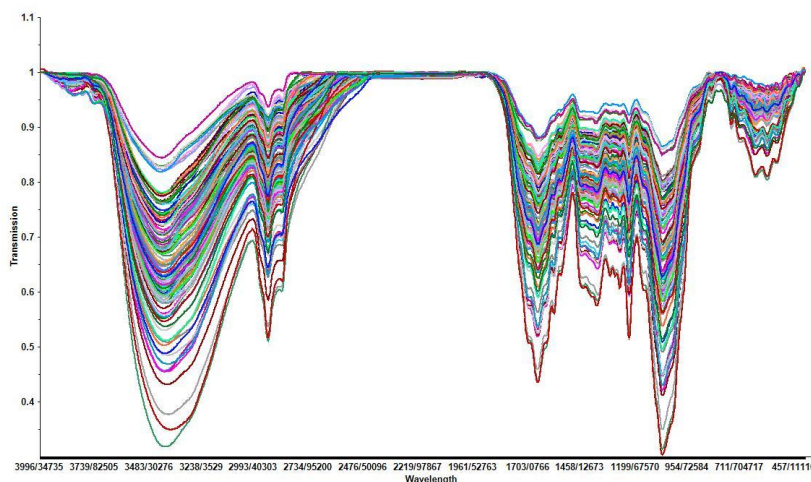
$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN+FN} \quad (2)$$

$$\text{CCR} = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FN} \quad (3)$$

بحث و نتایج

تحلیل داده‌های طیفی

طیف خام بدست آمده در محدوده MIR ($4000 - \text{cm}^{-1}$) از سه نوع وارپته متفاوت زعفران در شکل ۲ نشان داده شده است. تفاوت‌های مربوط به تغییرات کمی در شدت برخی باندها ناشی از تفاوت در نسبت غلظت مواد مؤثره ماده می‌باشد. پیک‌های موجود در طیف‌ها، بازتابی از تفاوت‌های ساختاری و

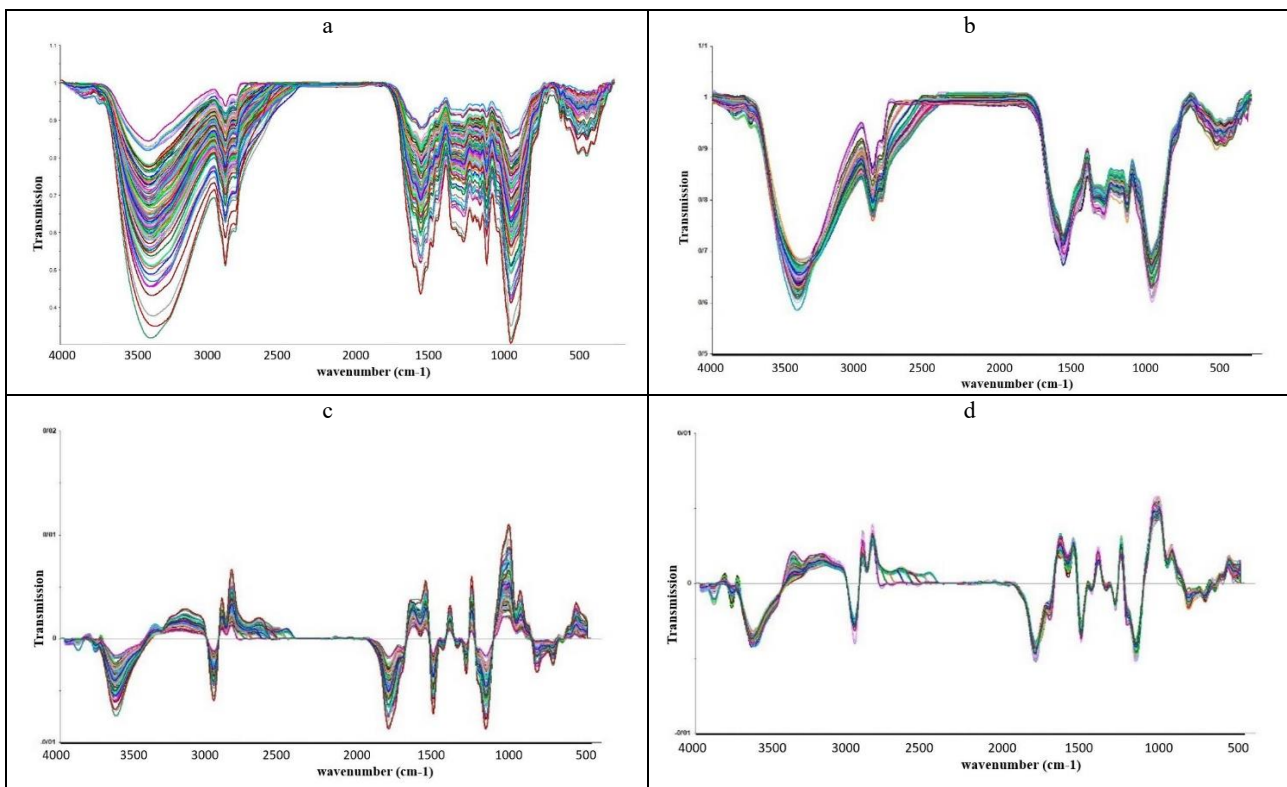


شکل ۲- نمودار طیف خام بدست آمده برای انواع زعفران

Figure 2- the acquired spectra for saffron types.

سایتری-گلای (S-G)، MSC و مشتق اول استفاده شد. شکل ۳a-c نتایج حاصل از این پیش‌پردازش‌ها را نشان می‌دهد.

همانطور که اشاره شد به دلیل وجود نویز و پراکندگی‌هایی در طیف‌ها، استفاده از روش‌های پیش‌پردازش ضروری است. در این پژوهش از روش‌های مختلف پیش‌پردازش از جمله فیلتر



شکل ۳- اشکال پیش‌پردازش‌های مختلف (a) SG (b) SG + MSC (c) SG + D1 (d) SG + MSC + D1

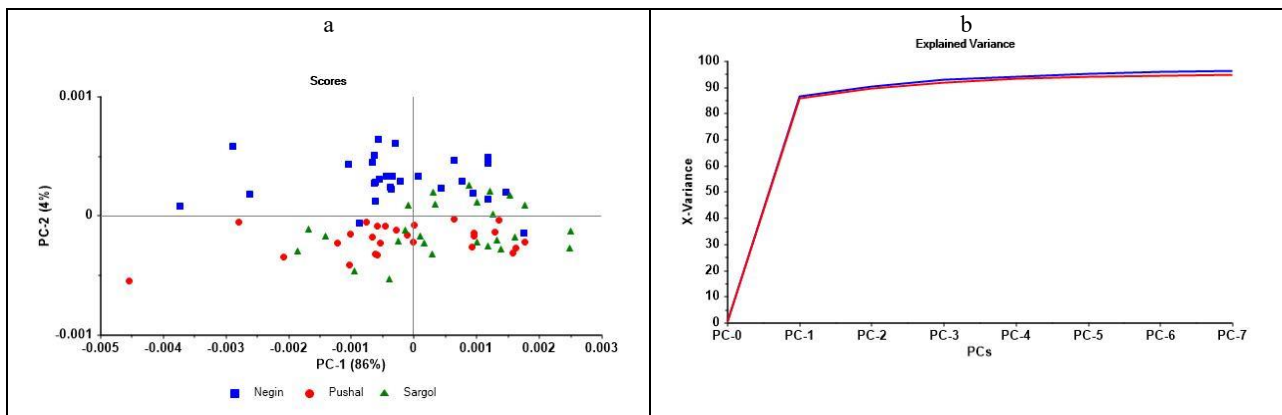
Figure 3- acquired spectra of different preprocessing methods a) SG b) SG + MSC c) SG + D1 d) SG + MSC + D1.

مشتق اول برای تصحیح خط پایه و همچنین افزایش تفاوت طیف‌ها به کار می‌رود (López-Maestresalas et al., 2019; Rinnan et al., 2009).

مدل PCA

مدل PCA برای پیش‌پردازش‌های مختلف اعمال شد تا میزان خوشه‌بندی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گیرد و بهترین نتیجه که حاصل از پیش‌پردازش SG + D2 بود در شکل ۴ نمایش داده شده است.

در روش S-G یک تابع چندجمله‌ای بر روی اندازه پنجره تعریف شده برآزش داده می‌شود. در این حالت، نقطه مرکزی پنجره با مقدار تخمینی حاصل از چندجمله‌ای جایگزین می‌شود و این فرایند به صورت تکراری در سراسر ناحیه موردنظر اعمال می‌گردد (López-Maestresalas et al., 2019). بنابراین باعث هموارسازی و اصلاح روندهای ناهموار در طیف‌ها می‌شود. در روش پیش‌پردازش MSC، ابتدا میانگین مجموعه طیف‌ها محاسبه می‌شود و سپس پارامترهایی تعیین می‌گردند تا طیف‌های جدید تا حد امکان نزدیک به طیف میانگین شوند.



شکل ۴- نمودار (a) اسکور و (b) explained-variance برای پیش‌پردازش SG + D2
Figure 4- the a) score plot b) explained-variance plots for SG + D2.

اعمال کردند. ۳ مولفه اصلی اول این مدل ۹۳٪ از تنوع داده‌ها را نشان داد. همچنین نمودار امتیازها نشان داد که نمونه‌های زعفران بر اساس خواستگاه جغرافیایی‌شان خوشه‌بندی شدند که بیانگر آن است که نمونه‌های متعلق به هر یک از کلاس‌ها ویژگی‌های FT-MIR مشابهی دارند.

مدل LDA

نتایج بدست آمده مدل LDA به عنوان مدل با نظارت برای پیش‌پردازش‌های مختلف و دو کرنل خطی و درجه دو در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل با ۷۰٪ داده‌ها آموزش دیده و با ۳۰٪ داده‌ها تست شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده اثرات مهم روش‌های پیش‌پردازش به کار برده شده در دقت مدل دارد به طوریکه استفاده از روش SG به تنهایی ضعیف‌ترین نتیجه را با دقت پیش‌بینی ۴۷/۲۲٪ برای کرنل خطی داشت. این موضوع نشان‌دهنده این است که استفاده از فیلتر SG به تنهایی برای حذف نویز و اثرات پراکندگی کافی نبوده و دقت جداسازی نمونه‌ها را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

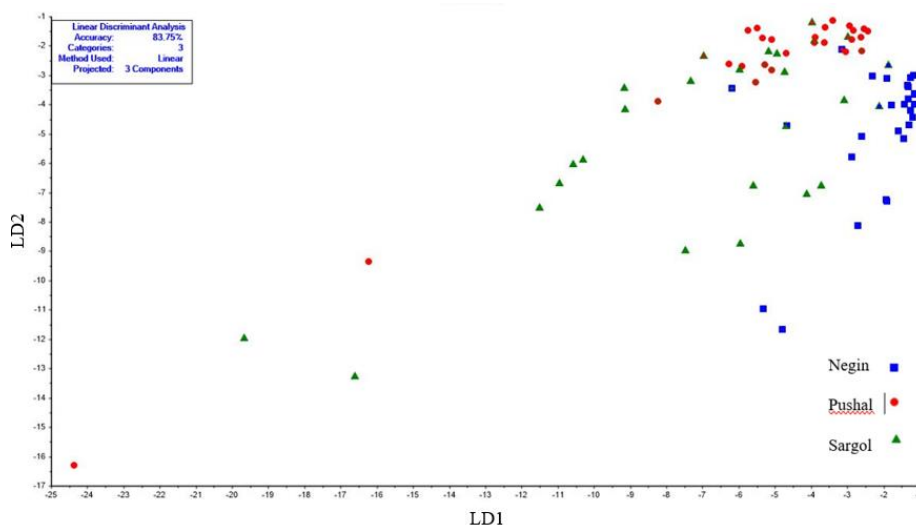
با توجه به شکل ۴- الف (کامنت داشت) مولفه اساسی اول (PC1) مقدار ۸۶٪ از کل واریانس داده را نشان می‌دهد و مولفه اساسی دوم (PC2) ۴٪ از واریانس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، خوشه‌بندی قابل قبولی بین ۳ کلاس انجام گرفته است. مطابق شکل a-۴ مدل در تفکیک کلاس‌های نگین و سرگل موفق عمل کرده، زیرا این دو کلاس در امتداد مهمترین مولفه (PC1) به صورت قابل قبولی تفکیک شده‌اند. اما گروه‌های پوشال و سرگل احتمالاً بدلیل ویژگی‌های مشابه در فضای مولفه اساسی نزدیک به هم قرار گرفته و یا همپوشانی دارند. نمودار explained-variance (شکل b-۴) درصد تجمعی از کل واریانس را که توسط هر مولفه اصلی برای داده‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی توضیح داده می‌شود نشان می‌دهد. PC1 بیشترین مقدار واریانس (۸۶٪) را پوشش می‌دهد و PC2 مقدار ۴٪ از واریانس کل داده‌ها را شامل می‌شود. مولفه‌های بعدی به طور جزئی بهبود ایجاد می‌کنند و واریانس پس از مولفه اصلی سوم (PC3) به حالت اشباع نزدیک می‌شود. (Elhamdaoui et al., 2022) مدل PCA را بر داده‌های طیفی MIR زعفران مراکشی برای بررسی اصالت جغرافیایی و همچنین تشخیص تقلب آن

جدول ۱- نتایج بدست آمده مدل LDA برای پیش‌پردازش‌های مختلف
 Table 1- The results of LDA model for different preprocessing methods

پیش‌پردازش Preprocessing	کرنل‌ها Kernels	کالیبراسیون Calibration	پیش‌بینی Prediction
SG	خطی Linear	60.71	47.22
	درجه دو Quadratic	61.9	41.66
SG + MSC	خطی Linear	66.67	55.55
	درجه دو Quadratic	70.24	61.11
SG + D1	خطی Linear	67.86	63.88
	درجه دو Quadratic	69.05	66.66
SG + D2	خطی Linear	76.19	75.00
	درجه دو Quadratic	71.43	72.22
SG + MSC + D2	خطی Linear	69.05	55.55
	درجه دو Quadratic	67.86	50.00
SG + D2 + MSC	خطی Linear	76.19	88.88
	درجه دو Quadratic	72.62	72.22

همراه با مدل SVM برای تشخیص تقلب گلرنگ در زعفران خالص به کار بردند. مشابه تحقیق حاضر بهترین نتیجه با پیش‌پردازش S-G + D1 + SNV و با دقت طبقه‌بندی ۱۰۰٪ بدست آمد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که طبقه‌بندی نوع زعفران چالش برانگیزتر از جداسازی گلرنگ از زعفران خالص است. زیرا آن‌ها متشکل از مواد متفاوت‌اند و شناسایی آن‌ها به مراتب از طبقه‌بندی ۳ نوع زعفران که از لحاظ مواد تشکیل دهنده یکسان‌اند و تنها تفاوت اندکی در بخش خاصه دارند راحت‌تر می‌باشد. شکل ۵ حالت گرافیکی مدل LDA را با استفاده از پیش‌پردازش SG + D2 + MSC نشان می‌دهد. ضعیف‌ترین دقت طبقه‌بندی مربوط به پیش‌پردازش SG با دقت ۴۷/۲۲٪ و ۴۱/۶۶٪ برای کرنل‌های خطی و درجه دو بود. این نتیجه را می‌توان به عدم تولدایی روش SG در حذف کامل نویز و تغییرات خط پایه نسبت داد. در واقع فقط هموارسازی منحنی باعث می‌شود تفاوت‌های واقعی بین نمونه‌های زعفران به درستی آشکار نشود.

به کارگیری روش MSC همراه با SG باعث بهبود چشمگیر نتایج شد به طوری که دقت پیش‌بینی مدل با کرنل درجه دو به ۶۱/۱۱٪ افزایش یافت. این افزایش دقت را می‌توان ناشی از عملکرد روش MSC در حذف تغییرات پایه و اصلاح اثرات پراکندگی در نمونه‌ها دانست. همچنین به کارگیری مشتقات مرتبه اول و دوم (SG+D1 و SG+D2) موجب بهبود بیشتر توان تفکیک مدل LDA گردید. پیش‌پردازش مشتق دوم به طور ویژه باعث افزایش دقت پیش‌بینی تا ۷۲/۲۲٪ برای کرنل خطی شد که نشان‌دهنده این است که این روش توانسته است اختلافات جزئی میان انواع زعفران را تقویت کرده و در عین حال اثر تغییر خط پایه را کاهش دهد. بهترین عملکرد طبقه‌بندی با استفاده از پیش‌پردازش ترکیبی SG + D2 + MSC و کرنل خطی شد، به طوری که دقت کالیبراسیون و پیش‌بینی به ترتیب برابر با ۷۶/۱۹٪ و ۸۸/۸۸٪ بود. این ترکیب تعادل مناسبی میان کاهش نویز، اصلاح خط پایه و برجسته‌سازی ویژگی‌های طیفی برقرار کرده و موجب تفکیک ۳ نوع زعفران گردید. در تحقیقی مشابه (Fattahi et al., 2025) روش FTIR-ATR را



شکل ۵- شکل گرافیکی مدل LDA برای پیش‌پردازش SG + D2 + MSC
Figure 5- The acquired graphical model of LDA for SG + D2 + MSC preprocessing.

بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که صادرات زعفران اکثراً به صورت پودری انجام می‌گیرد. برای بررسی عملکرد مدل در طبقه‌بندی هر کلاس، ماتریس اغتشاش برای ۳ کلاس مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ ماتریس اغتشاش نمونه‌های تست را برای پیش‌پردازش SG + D2 + MSC نشان می‌دهد.

در تحقیق دیگری (Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020) با استفاده از روش بینایی ماشینی به بررسی طبقه‌بندی ۳ نوع زعفران (سرگل، نگین و پوشال) پرداختند. آنها با استفاده از روش‌های استخراج ویژگی متفاوت، بهترین نتیجه را با استفاده از مدل SVM و با کرنل درجه دو با دقت ۸۳/۹٪ بدست آوردند. در این پژوهش جداسازی کلاله زعفران مورد

جدول ۲- ماتریس اغتشاش برای پیش‌پردازش SG + D2 + MSC
Table 2- The confusion matrix of SG + D2 + MSC preprocessing

	نگین Negin	پوشال Pushal	سرگل Sargol
نگین Negin	12	0	0
پوشال Pushal	0	12	0
سرگل Sargol	1	3	8
حساسیت Sensitivity	1	1	0.66
اختصاصیت Specificity	0.95	0.87	1
دقت CCR	100	100	66.66

دو کلاس شناسایی کرده است. در مقابل عملکرد مدل برای کلاس سرگل پایین‌تر بوده است. به طوریکه حساسیت برابر با ۰/۶۶ و CCR برابر با ۶۶/۶۶٪ بدست آمده که نشان‌دهنده اشتباه مدل در شناسایی برخی از نمونه‌های سرگل به عنوان نگین یا پوشال است. این کاهش دقت می‌تواند ناشی از شباهت

طبق جدول ۲ مدل در طبقه‌بندی نمونه‌های نگین و پوشال عملکرد خوبی داشته است و برای هر دو کلاس حساسیت و نرخ طبقه‌بندی صحیح برابر با ۱۰۰٪ بدست آمد. مقادیر اختصاصیت برابر با ۰/۹۵ برای کلاس نگین و ۰/۸۷ برای پوشال بیانگر آن است که مدل به ندرت سایر کلاس‌ها را به اشتباه به عنوان این

ایرانی به کار گرفته شد و بهترین نتیجه با پیش‌پردازش SG + D2 + MSC و مدل LDA با کرنل خطی با دقت ۸۸/۸۸٪ بدست آمد. در تحقیقات آتی می‌توان طبقه بندی انواع زعفران ایرانی را با روش‌های غیرمخرب دیگر مانند بینی الکترونیکی و مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از گزارش نهائی طرح پژوهشی به شماره ۴۳۷۷/ص ۳/۱۲/۲۲ می‌باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا گردیده است.

References

- Atefi, M., Akbari Oghaz, A., & Mehri, A. (2013). Drying effects on chemical and sensorial characteristics of saffron. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 8 (3), 201-208 .
- Dai, H., Gao, Q., & He, L. (2020). Rapid determination of saffron grade and adulteration by thin-layer chromatography coupled with Raman spectroscopy. *Food Analytical Methods*, 13, 2128-2137 .
- Elhamdaoui, O., El Orche, A., Cheikh, A., Laarej, K., Karrouchi, K., el Karbane, M., & Bouatia, M. (2022). Tracing the geographical origin of moroccan saffron by mid-infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.30744/brjac.2179-3425.AR-23-2022>
- Fattahi, S. H., Kazemi, A., & Seyfari, Y. (2025). Accurate detection of safflower adulteration in saffron by ATR-FTIR spectroscopy and feature selection and machine learning algorithms. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19 (9), 6295-6309. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03371-x>

طیفی میان کلاس‌ها یا کمبود ویژگی‌های متمایز در نمونه‌های سرگل باشد.

نتیجه‌گیری

تشخیص سنتی انواع عمده زعفران ایرانی شامل نگین، سرگل و پوشال می‌تواند دارای مشکلات تشخیصی و انسانی باشد. بنابراین استفاده از روش‌های غیرمخرب و دقیق مانند طیفسنجی تبدیل فوریه می‌تواند بسیار کارایی داشته باشد. در تحقیق حاضر ترکیب روش طیفسنجی تبدیل فوریه و روش‌های مختلف پیش‌پردازش و مدل‌سازی برای جداسازی انواع زعفران

- Foschi, M., Tozzi, L., Di Donato, F., Biancolillo, A., & D'Archivio, A. A. (2022). A Novel FTIR-based chemometric solution for the assessment of saffron adulteration with non-fresh stigmas. *Molecules*, 28 (1), 33.
- Karuk Elmas, S. N., Arslan, F. N., Akin, G., Kenar, A., Janssen, H. G., & Yilmaz, I. (2019). Synchronous fluorescence spectroscopy combined with chemometrics for rapid assessment of cold-pressed grape seed oil adulteration: Qualitative and quantitative study. *Talanta*, 196, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.026>
- Kazemi, A., Mahmoudi, A., & Khojastehnazhand, M. (2023). Detection of sodium hydrosulfite adulteration in wheat flour by FT-MIR spectroscopy. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17 (2), 1932-1939. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01763-x>
- López-Maestresalas, A., Insausti, K., Jarén, C., Pérez-Roncal, C., Urrutia, O., Beriain, M. J., & Arazuri, S. (2019). Detection of minced lamb and beef fraud using NIR spectroscopy. *Food Control*, 98, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.003>

- Malavi, D., Nikkiah, A., Alighaleh, P., Einafshar, S., Raes, K., & Van Haute, S. (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>
- Mohamadzadeh Moghadam, M., Taghizadeh, M., Sadrnia, H., & Pourreza, H. R. (2020). Nondestructive classification of saffron using color and textural analysis. *Food Science & Nutrition*, 8 (4), 1923-1932 .
- Pan, F., Song, G., Gan, X., & Gu, Q. (2014). Consistent feature selection and its application to face recognition. *Journal of Intelligent Information Systems*, 43 (2), 307-321. <https://doi.org/10.1007/s10844-014-0324-5>
- Petrakis, E. A., & Polissiou, M. G. (2017). Assessing saffron (*Crocus sativus* L.) adulteration with plant-derived adulterants by diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy coupled with chemometrics. *Talanta*, 162, 558-566 .
- Rinnan, Å., Berg, F. V. D., & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28 (10), 1201-1222. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007>
- Severcan, F., Akkas, S. B., Türker, S., & Yucel, R. (2012). Methodological approaches from experimental to computational analysis in vibrational spectroscopy and microspectroscopy. *Advances in Biomedical Spectroscopy*, 6, 12-52. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-059-8-12>
- Shahdadi, H., Barati, F., Bahador, R. S., & Eteghadi, A. (2016). Clinical applications of saffron (*Crocus sativus*) and its constituents :A literature review. *Der Pharmacia Lettre*, 8 (19), 205-209 .
- Tharwat, A., Gaber, T., Ibrahim, A., & Hassanien, A. E. (2017). Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *Ai Communications*, 30, 169-190. <https://doi.org/10.3233/AIC-170729>