

## مقاله علمی - پژوهشی

# ارزیابی الگوهای شناسایی برای تشخیص ناخالصی روغن کنجد توسط سامانه ماشین‌بويایی مبتنی بر تحلیل چند متغیره

هادی حسینی<sup>۱</sup>, سعید مینایی<sup>۲\*</sup> و بابک بهشتی<sup>۳</sup>

۱ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

### چکیده

روغن کنجد یکی از روغن‌های بسیار با کیفیت خوراکی است که قیمت بالای آن، انگیزه را برای تولید نمونهٔ تقلیبی افزایش داده است. بنابراین، شناسایی ناخالصی به ویژه با ابزار یا روش‌های غیرتماسی برای تشخیص خلوص روغن کنجد نسبت به نوع تقلیبی آن، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، میزان اسیدهای چرب نمونه‌های خالص روغن کنجد، کلزا، آفتابگردان و ترکیب آنها با سطوح ناخالصی (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) به روش گازکروماتوگرافی تعیین و سپس، قابلیت سامانه ماشین‌بويایی طراحی شده بر پایه ده حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی برای تشخیص و طبقه‌بندی نمونه‌ها ارزیابی شد. پس از استخراج بردار و پیزگی پاسخ حسگرها نسبت به ترکیبات فرار مواد آلی روغن‌ها، داده‌های پیش‌پردازش شده با روش‌های تحلیل چندمتغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تحلیل تکیک خطی، حداقل مربعات جزئی، K-نزدیک‌ترین همسایه و ماشین بردار پشتیبان به منظور تشخیص و طبقه‌بندی نمونه‌های ناخالص، بررسی شدند. در روش PCA، واریانس مجموعه داده‌ها ۹۵/۶۸ درصد به دست آمد. برای انتخاب الگوی مناسب با دقت بالا، داده‌های به دست آمده با روش‌های SVM، KNN، LDA و طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد ماشین بردار پشتیبان با تابع کرنل پایه شعاعی در روش C-SVM دارای بیشترین دقت طبقه‌بندی بود و دقت آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۹۶/۳۴ و ۹۰/۵۶ درصد به دست آمد. بعد از آن، مدل‌های KNN و LDA به ترتیب دارای دقت طبقه‌بندی ۹۲/۳۰ و ۸۹/۸۳ درصد بودند. بر پایه نتایج به دست آمده، این سامانه به همراه الگوریتم طبقه‌بندی مناسب می‌تواند به عنوان روشی غیرمخرب برای طبقه‌بندی موفق نمونه‌ها و تشخیص ناخالصی‌های روغن کنجد به کار گرفته شود.

### واژه‌های کلیدی

بوسنجه، بینی‌الکترونیک، تحلیل مؤلفه اصلی، روغن خوراکی، غیرمخرب

### مقدمه

#### مارگارین و صابون‌های گیاهی استفاده می‌شود

روغن کنجد، روغن خوراکی با کیفیتی است که از دانه کنجد به دست می‌آید. این روغن به دلیل داشتن مواد مغذی و عناصر غیرآلی از نظر سلامت دارای مزایای بسیاری است (Nam *et al.*, 2014). این روغن به دلیل داشتن بوی ملایم و طعم دلپذیر، برای تهیه سالاد و پخت‌وپز یا در تولید

روغن کنجد، روغن خوراکی با کیفیتی است که از دانه کنجد به دست می‌آید. این روغن به دلیل داشتن مواد مغذی و عناصر غیرآلی از نظر سلامت دارای مزایای بسیاری است (Nam *et al.*, 2014). این روغن به دلیل داشتن بوی ملایم و طعم دلپذیر، برای تهیه سالاد و پخت‌وپز یا در تولید

سطح کیفی و افزایش قدرت رقابت در بازارهای داخلی و خارجی، تشخیص میزان ناخالصی روغن‌های خوراکی است (Beygami *et al.*, 2013). تا کنون روش‌های آزمایشگاهی و ابزارهای متعددی برای تشخیص ناخالصی در مواد غذایی و روغن‌های خوراکی توسعه و آزموده شده‌اند، از جمله این روش‌های می‌توان به طیفسنجی رامان<sup>۸</sup> (Baeten & Aparicio, 2000)، کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا<sup>۹</sup> (Seo *et al.*, 2010)، طیفسنج فروسرخ<sup>۱۰</sup> (Lerma-García *et al.*, 2010)، تشدید مغناطیس هسته‌ای<sup>۱۱</sup> (Nam *et al.*, 2014)، کروماتوگرافی گازی<sup>۱۲</sup> (Peng *et al.*, 2015) و طیفسنجی مبتنی بر جابه‌جایی یون<sup>۱۳</sup> (Zhang *et al.*, 2016) اشاره کرد. بیشتر این روش‌ها وقت‌گیر هستند و برای به کارگیری آنها نیاز به ابزارهای دقیق و گران قیمت خواهد بود (Das *et al.*, 2015). از دیدگاه رعایت حقوق مصرف‌کننده و تولیدکننده، استفاده از روش‌های غیرمخرب، سریع و مؤثر که در مقایسه با روش‌های شیمیایی علاوه بر صرف هزینه کمتر نیاز به حداقل زمان داشته باشند اهمیت بسزایی دارد (Ozulku *et al.*, 2017). از این‌رو، در چند دهه اخیر روش‌های بینایی، بوبایی و چشایی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که مهم‌ترین ویژگی‌های حسی در کیفیت‌سنجی مواد خوراکی رایحه است، بنابراین بوبایی‌سنجی روشی پیشرفت‌به منظور دریافت اطلاعات متغیرهایی است که بر کیفیت مواد خوراکی

بیشترین سهم واردات از کشور هند با حجم ۹۱۲ تن است (Anon, 2020). گسترش روغن‌های گیاهی با ارزش تجاری مستعد تقلب در روغن‌های خوراکی با درجه کیفی بالاست که از دیدگاه حقوق مصرف‌کننده منجر به ایجاد رقابت ناعادلانه و به خطر افتادن سلامت انسان می‌شود (Zhang *et al.*, 2012). بر اساس پایگاه اطلاعاتی کتابخانه ملی وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا<sup>۱۴</sup>، روغن کنجد روغنی غیراشباع با ارزش غذایی بالاست که ۸۰ درصد آن متشکل از اسیدهای چرب (حدود ۴۱ درصد اسید لینولئیک<sup>۲</sup> و ۳۹ درصد اسید اولئیک<sup>۳</sup>) است (Hwang, 2005). بر اساس دستورالعمل تولید روغن کنجد سازمان ملی استاندارد ایران به شماره ۱۴۹۵۵ (Anon, 2015) این روغن به دو روش پرس سرد و گرم تولید می‌شود که در روش پرس سرد علاوه بر عطر و طعم ملایم، حاوی نسبت بیشتری از اسیدهای چرب است (Shao *et al.*, 2015) و به دلیل داشتن مواد مغذی مانند اسیدهای چرب اشباع نشده، سازمین<sup>۴</sup>، سرامولین<sup>۵</sup>، سسامول<sup>۶</sup>، توکوفول<sup>۷</sup> و عناصر غیرآلی از نظر سلامت دارای مزایای بسیاری است (Nam *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016). با توجه به مصرف زیاد روغن کنجد در کشورهای آسیایی، به خصوص در ایران، به دلیل قیمت بالای آن در مقایسه با سایر روغن‌های گیاهی مانند ذرت، آفتابگردان و کلزا، انگیزه برای افراد سودجو به منظور تقلب و ترکیب کردن این روغن‌ها با روغن کنجد ایجاد می‌شود. بنابراین یکی از ضرورت‌های ارتقای

1- USDA National Nutrient Database

2- Linoleic Acid

3- Oleic Acid

4- Sesamin

5- Sesamolin

6- Sesamol

7- Tocopherol

8- Raman Spectrometry

9- Mass Spectroscopy

10- High-Efficiency Liquid Chromatography

11- Infrared Spectroscopy

12- Nuclear Magnetic Resonance Spectrometry

13- Gas Chromatography

14- Ion-Mobility Spectrometry

ANN و LDA به ترتیب ۱۰۰ و ۹۸/۶ درصد به دست آمد (Ramesh *et al.*, 2019). در تحقیقی به منظور تشخیص تقلب در روغن حیوانی گاوی از سامانه ماشین‌بویایی<sup>۴</sup> مبتنی بر حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی<sup>۵</sup> استفاده شد که نتایج حاصل از آنالیز مؤلفه‌های اصلی با دو مولفه PCA و PC2 به ترتیب واریانس ۹۸ و ۹۷ درصد برای ترکیب روغن حیوانی با روغن نباتی و دنبه شد. نتایج حاصل از دقیق طبقه‌بندی برای روغن حیوانی ترکیب شده با روغن نباتی و دنبه به ترتیب ۹۵/۲۴ و ۹۷/۱۵ درصد گزارش شد (Ayari *et al.*, 2020). زارع‌زاده و همکاران (Zarezadeh *et al.*, 2021) با استفاده از سامانه ماشین‌بویایی به تشخیص تقلب و انتخاب الگوریتم بهینه طبقه‌بندی پرداختند و نشان دادند روش طبقه‌بندی K-نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۶</sup> با ۸۹/۸۹ درصد و روش ماشین بردار پشتیبان<sup>۷</sup> با ۸۶/۵۲ درصد بیشترین دقیق طبقه‌بندی را دارد. روش‌های آنالیز حسی از روش‌های سریع محسوب می‌شود ولی به دلیل مشکلاتی مانند ناپایداری، تکرار پذیری و در نتیجه کاهش دقیق به هنگام آزمایش مناسب نیستند. از طرفی، روش‌های آزمایشگاهی علاوه بر دقیق بالایی که دارند در زمرة روش‌های هزینه‌بر و مخرب هستند و نیاز به افراد متخصص به منظور آماده‌سازی و تحلیل نتایج دارند (Jurs *et al.*, 2000).

از آنجا که در زمینه تشخیص تقلب روغن کنجد با استفاده از سامانه ماشین‌بویایی مبتنی بر روش‌های تحلیل چند متغیره<sup>۸</sup> تحقیقات اندک است، در این پژوهش تشخیص تقلب روغن کنجد خالص<sup>۹</sup> در

تأثیرگذار خواهد بود (Kiani & Minaei, 2015) بینی‌الکترونیک ابزاری غیرمخرب با قابلیت اعتماد بالاست که نسبت به سایر روش‌ها، دارای مزایایی چون کاربری آسان، هزینه کم و سرعت بالاست (Tian & Cui, 2013; Loutfi *et al.*, 2015)

در سال‌های اخیر در زمینه کاربرد بینی‌الکترونیک برای کیفیت‌سنجی و شناسایی تقلب مواد غذایی پژوهش‌های بسیار شده است؛ پژوهشگران برای تشخیص تقلب در روغن کنجد و روغن دانه کاملیا از بینی‌الکترونیک توسط روش‌های تحلیل مولفه اصلی<sup>۱</sup>، تحلیل تفکیک خطی<sup>۲</sup> و شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد روش PCA برای تمایز تقلب در روغن دانه کاملیا کاربرد ندارد اما می‌تواند در آشکارسازی تقلب روغن کنجد به کار رود. همچنین، دقیق پیش‌بینی توسط شبکه عصبی مصنوعی برای روغن دانه کاملیا و روغن کنجد به ترتیب ۸۳/۶ و ۹۴/۵ درصد گزارش شد (Hai & Wang, 2006). در تحقیقی دیگر، به منظور تشخیص تقلب روغن زیتون با نسبت‌های ترکیبی متفاوت با روغن فندق از بینی‌الکترونیک بهره‌گیری شد و روش PCA توانست محصله تقلبی را تشخیص دهد (Mildner-Szkudlarz & Jeleń, 2008). همچنین، به منظور طبقه‌بندی ارقام مختلف برنج ایرانی و برنج تقلیبی بر اساس ترکیبات فرار توسط سامانه ماشین‌بویایی، روش PCA با دو مولفه اصلی ۸۹ درصد واریانس داده‌ها برای پنج نمونه از ارقام اصلی برنج را توصیف کرد و دقیق طبقه‌بندی در روش

1- Principal Component Analysis

3- Artificial Neural Network

5- Metal Oxide Semiconductor

7- Support Vector Machine

9- Pure Sesame Oil

2- Linear Discrimination Analysis

4- Olfaction Machine

6- K-Nearest Neighbors

8- Multivariate Analysis

کلزا و آفتابگردان از رایج‌ترین روغن‌های گیاهی هستند که برای تقلب در روغن کنجد کاربرد دارند (Hai & Wang, 2006; Seo *et al.*, 2010). تعیین خالص بودن نمونه‌های روغن کنجد، کلزا و آفتابگردان و ترکیبات اسیدهای چرب آنها توسط دستگاه گازکروماتوگرافی مدل ۶۸۹۰ ساخت شرکت Agilent در واحد خدمات آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی بررسی شد. پائزده نمونه شامل ترکیب روغن کنجد خالص با روغن آفتابگردان و کلزا با درصد ناخالصی‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به اندازه ۲۰ گرم تهیه شدند (Hosseini *et al.*, 2021).

برای آزمایش از یک ظرف شیشه‌ای با درپوش واشردار کاملاً آببندی استفاده گردید و نمونه‌ها برای رسیدن به تعادل دمایی و ایجاد ترکیبات فرار موادآلی به مدت ۱۰ دقیقه در دمای کنترل شده C  $\pm 30$  نگهداری شدند (Masella *et al.*, 2010). در این پژوهش، از هر نمونه روغن کنجد تقلیبی با درصد مشخص ۱۵ نمونه ۲۰ گرمی تهیه شد. با توجه به ۱۰ حسگرگازی به کار رفته در سامانه مذکور، تعداد داده‌های مربوط به یک گروه  $= 15 \times 10 = 150$  خواهد بود.

#### ساختمان بینی‌الکترونیک

ساختمان بینی‌الکترونیک مورد استفاده در این پژوهش شامل محفظه نمونه، آرایه حسگرهای گازی، واحد جمع‌آوری و ثبت اطلاعات است (Hosseini *et al.*, 2021). واحد آرایه حسگرهای گازی مجهز شد به چهار حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی MQ ساخت کشور چین و شش حسگر TGS شرکت مهندسی فیگارو ژاپن. مشخصات فنی حسگرها در جدول ۱ آمده است. از آنجا که دمای کارایی مناسب حسگرها در محدوده

ترکیب با روغن کلزا<sup>۱</sup> و آفتابگردان<sup>۲</sup> توسط سامانه ماشین‌بويایي به عنوان روشی سریع و غيرمخرب ارزیابی شد. در ابتدا ترکیب‌های اسیدهای چرب روغن کنجد، کلزا، آفتابگردان و ترکیب آنها با سطوح مختلف ناخالصی (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) با روش کروماتوگرافی گازی تعیین شد. در این پژوهش سامانه ماشین‌بويایي مبتنی بر ده حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی به منظور تشخیص ناخالصی روغن کنجد و طبقه‌بندی نمونه‌ها به کمک روش‌های تحلیل چندمتغیره طراحی و ارزیابی شد. مهم‌ترین هدف‌های این پژوهش عبارت‌اند از: (۱) کاهش ابعاد داده‌ها و مقایسه عملکرد کارایی حسگرها با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی به عنوان یک روش بدون نظارت، (۲) طبقه‌بندی جداگانه نمونه‌های روغن کنجد تقلبی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از پاسخ حسگرها و انتخاب الگوی مناسب بر اساس نتایج الگوریتم‌های طبقه‌بندی به کمک روش‌های تحلیل تفکیک خطی، K-نزدیک‌ترین همسایگی و ماشین بردار پشتیبان و (۳) ارزیابی و انتخاب حسگرهای مناسب و کارامد با روش حداقل مربعات جزئی و حذف حسگرهای دارای کمترین ضریب تأثیر.

#### مواد و روش‌ها

##### آماده‌سازی نمونه

روغن کنجد استفاده شده در این پژوهش از شهرستان اردکان، استان یزد با استفاده از روش پرس سرد تهیه و برای به حداقل رساندن اکسیدشدن روغن، ظرف‌های نمونه کاملاً پر شدند. به منظور جلوگیری از افت کیفیت، نمونه‌ها در محل تاریک و در دمای اتاق نگهداری شدند. روغن‌های

رسیدن به پایداری دمایی در محدوده دمایی توصیه شده، ۳۰ دقیقه پیش از شروع آزمایش، مجموعه آرایه حسگری راهاندازی شد تا به دمای مورد نظر سازنده برای کالیبره کردن آنها و حصول اطمینان از کارکرد دقیق حسگرها و همچنین، برسد.

جدول ۱- مشخصات سنسورهای استفاده شده در دستگاه بینی الکترونیک

Table 1- Specifications of sensors used in the electronic nose device

حدوده تشخیص (ppm) Detection range(ppm)	کاربردهای اصلی Main applications	نام تجاری حسگر Sensor brand
0.05-10	آمونیاک، الکل، دود، بنزن و دی اکسید کربن / Alcohol	MQ3
10-300	Ammonia Gas, Alcohol, Smoke, Benzene, Carbon dioxide, / Hydrogen Sulfide	MQ135
1-200	Aldehydes, Alcohol, Ketones, Aromatic Compounds	MQ136
5-500	Methane, Propane, Butane / Organic Solvent Vapor	MQ138
500-10000	Natural gases, Methane / Hydrogen Sulfide, Ammonia, Toluene	TGS813
50-5000	گازهای طبیعی و متان / Alcohol, Methane, Isobutane, Propane	TGS822
500-10000	سولفید هیدروژن، آمونیاک، تولوئن / الكل ، متان ، ایزو بوتان ، پروپان	TGS842
1-30	Hydrogen Sulfide, Ammonia, Toluene / Alcohol, Organic Solvent Vapor	TGS2602
500-10000	الكل ، بخار حلال های آلی / Alcohol, Organic Solvent Vapor	TGS2610
50-5000		TGS2620

هشت کاناله با پردازنده مرکزی ATmega328 و ولتاژ عملیاتی ۵ ولت بهره‌گیری شد. با توجه به تعداد حسگرهای استفاده شده در این دستگاه، این میکروکنترولر تمام ورودی‌های آنالوگ لازم برای خواندن اطلاعات مربوط به پاسخ حسگرها را ندارد. بنابراین، داده‌های مربوط به پاسخ حسگرها توسط یک مولتیپلکسر ۱۶ کاناله با فرکанс نمونه‌برداری  $5\text{Hz}$  ثبت شد (Voss *et al.*, 2019).

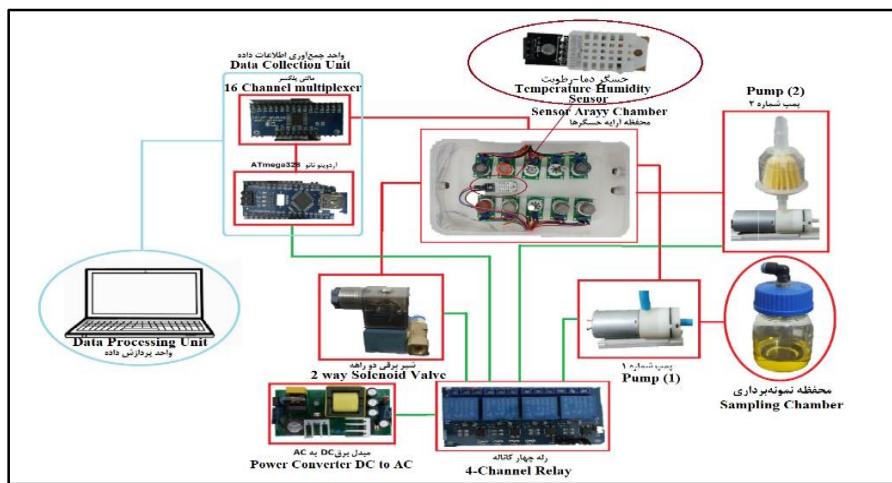
از آنجا که حسگرها، پمپ‌ها و شیر برقی به کار رفته برای راهاندازی نیاز به جریان و ولتاژ بالایی داشتند از رله چهار کاناله ۵ ولتی برای کنترل عملیات استفاده شد. برق مدار راهانداز دستگاه، توسط واحد مبدل برق DC به AC با جریان ولتاژ ۱۲ تأمین گردید. طرح‌واره مربوط به دستگاه بینی الکترونیک طراحی شده در شکل ۱ آمده است.

انتخاب مجموعه حسگرها اهمیت زیادی دارد به طوری که با انتخاب مجموعه مناسبی از آنها می‌توان طیف وسیعی از ترکیبات فرار مواد آلی<sup>۱</sup> را شناسایی کرد (Doleman & Lewis, 2001). در محفظه آرایه حسگر گازی به منظور کنترل شرایط آزمایش و کمینه‌سازی تأثیرات دما و رطوبت، از مازول حسگر دما-رطوبت مدل AM2302 (DHT22) با محدوده رطوبت نسبی  $0\text{-}100\%$  درصد ساخت کشور چین استفاده شد. برای انتقال بو به محفظه آرایه حسگرها و تخلیه آن به ترتیب از دو میکرو پمپ هوای دیافراگمی ۶ ولتی DC استفاده شد و نیز فیلتر پاکسازی هوای محیط، یک شیر برقی دو راهه در حالت عادی بسته<sup>۲</sup> ۵ ولتی Ceme (ساخت ایتالیا)، مجموعه اتصالات و شیلنگ پنوماتیک از جنس پلی اورتان به کار گرفته شد. به منظور جمع‌آوری و ثبت داده‌ها، از یک مازول برد آردوبینو NANO

1- Volatile Organic Compounds

3- Normally-Closed

2- Relative Humidity



شکل ۱- طرحواره دستگاه بینی الکترونیک تشخیص روغن کنجد تقلبی

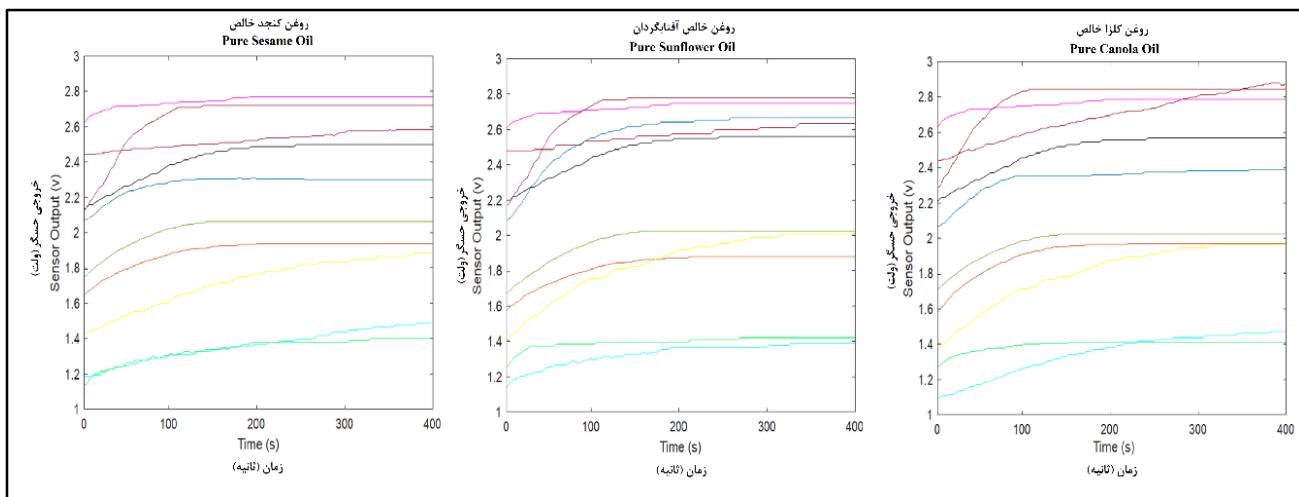
Fig. 1- Schematic of the electronic nose system detection of adulteration sesame oil

(مانا) ۴۰۰ ثانیه ثبت شد (پمپ ۱ باز، پمپ ۲ و شیر برقی بسته). در مرحله پاکسازی محفظه حسگرها و محفظه نمونه، پمپ ۲ و شیر برقی برای عبور ترکیبات فرارآلی ناشی از بوی اشباع شده نمونه از روی آرایه حسگری به مدت ۲۱۰ ثانیه باز مانده تا بوی مانده خارج و سامانه برای آزمایش بعدی آماده شود. کل فرایند آزمایش ۸۰۰ ثانیه به طول انجامید. لازم است گفته شود که زمان مورد نیاز در هر مرحله کاملاً تجربی و بر اساس آزمون و خطاباً اجرای آزمایش‌های متعدد و بررسی پاسخ حسگرها به دست آمد (Khodamoradi *et al.*, 2019).

پاسخ ولتاژی حسگرها مربوط به نمونه‌های روغن کنجد، کلزا و آفتابگردان بر حسب زمان و تغییرات ولتاژ در شکل ۲ ارائه شده است.

### فرایند آزمایش و داده‌برداری

در این بخش، به منظور دستیابی به الگوی مناسب از پاسخ حسگرها، ابتدا ۲۰ گرم از نمونه روغن کنجد تقلبی در ظرف نمونه ریخته شد تا پس از رسیدن به تعادل دمایی و تولید ترکیبات فرار مواد آلی آماده بررسی شود. فرایند نمونه‌برداری شامل سه مرحله است: تصحیح خط‌مبنا، تزریق بوی نمونه و پاکسازی محفظه حسگرها. در مرحله تصحیح خط‌مبنا به منظور رساندن پاسخ آرایه حسگر به حالت پایدار، هوای تصفیه شده توسط پمپ ۲ به مدت ۱۹۰ ثانیه به محفظه حسگرها تزریق شد (پمپ ۱ بسته و شیر برقی باز). با توجه به نوسان‌های اندک در ولتاژ خروجی هر حسگر، مدت زمان برای رسیدن پاسخ حسگرها به حالت پایدار



شکل ۲- پاسخ آرایه حسگرهای گازی به نمونه‌های خالص روغن کنجد، آفتابگردان و کلزا

Fig. 2- Response of gas sensor array to pure samples of sesame, sunflower and rapeseed oil

### سطح بالا و پایینی دارند نرمال می‌شوند

(Pearce *et al.*, 2006)

$$Y_s(t) = \frac{X_s(t) - X_s(0)}{X_s(0)} \quad (1)$$

که در آن،

$X_s$ =کمترین پاسخ حسگر پیش از مرحله اندازه‌گیری (بی بعد)؛  $X_s(t)$  پاسخ حسگر در زمان  $t$ ؛ و  $Y_s$ =پاسخ پیش‌پردازش شده.

داده‌های پیش‌پردازش شده به عنوان ماتریس ورودی برای طبقه‌بندی نمونه‌ها و تعیین الگوی مناسب انتخاب و با روش‌های تحلیل چند متغیره PCA، LDA، PLS، SVM و KNN بررسی و ارزیابی شدند. PCA روشی آماری بدون نظرارت<sup>۵</sup> است که بر اساس تبدیل متعامد به دست می‌آید و مؤلفه‌هایی که بیشترین تأثیر را در مقدار واریانس دارند، حفظ می‌شوند. این روش به درک این موضوع کمک می‌کند که یک نمونه با چه نسبتی از سایر نمونه‌ها تمایز دارد و کدام متغیرها بیشترین سهم را در این جداسازی نقش دارند (Men *et al.*, 2014).

### استخراج ویژگی و تحلیل داده

پیش‌پردازش اطلاعات تأثیر زیادی بر عملکرد روش‌های شناسایی الگو دارد و با توجه به نوع حسگر متفاوت است (Arshak *et al.*, 2004). بنابراین، برای تحلیل و طبقه‌بندی پاسخ حسگرها قبل از انتخاب الگوی تشخیص مناسب، عملیات پیش‌پردازش داده دنبال شد. تعداد ۱۵۰ داده حاصل از پاسخ ۱۰ حسگر در سامانه ماشین‌بويابي برای هر گروه (نمونه) ثبت شد. بنابراین، برای ۱۵ نمونه روغن یک مجموعه داده با تعداد ۲۲۵۰ داده ثبت گردید. روش پیش‌پردازش داده شامل روش‌های کسری<sup>۱</sup>، نسبی<sup>۲</sup> و تفاضلی<sup>۳</sup> است. در این پژوهش، از روش کسری طبق رابطه ۱ بهره‌گیری شد. این روش، افزون بر تصحیح خط مبدأ و نرمال‌سازی داده<sup>۴</sup>، کاربرد گسترده‌ای در حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی دارد (Pearce *et al.*, 2006). در این روش، پاسخ سطح مبدأ از پاسخ حسگر کم می‌شود و پس از تقسیم بر پاسخ سطح مبدأ، پاسخ پیش‌پردازش شده حسگر نرمال خواهد شد. در اصل حسگرهایی که پاسخ

1- Fractional Method

3- Differential Method

5- Unsupervised

2- Relative Method

4- Data Normalization

6- Supervised

ترکیب وزنی آن همسایگی‌ها را به عنوان پیش‌نمونه انتخاب کند (Wu *et al.*, 2020). در فرایند آموزش مدل KNN، ویژگی‌های ورودی از مدل و پارامتر داخلی K تأثیر ویژه‌ای بر تشخیص مدل دارد (Zhu *et al.*, 2018). ماشین بردار پشتیبان از دیگر روش‌های یادگیری با نظارت است که در زمینه خوشه‌بندی و مدل‌سازی استفاده می‌شود (Ye *et al.*, 2011). این روش طبقه‌بندی قادر به جداسازی کلاس‌ها از یکدیگر با استفاده از مزهای خطی است. هدف آن یافتن آبر صفحه<sup>۱</sup> بهینه به عنوان یک سطح تصمیم‌گیری است به گونه‌ای که حاشیه بین دو کلاس را بیشینه و طبقه‌بندی آنها را پیش‌بینی کند، توضیحات کامل در مورد اصول و نحوه عملکرد روش SVM در مقالات مختلف (Jiang *et al.*, 2021; Makarichian *et al.*, 2021; Esteki *et al.*, 2017) آمده است.

## نتایج و بحث

پاسخ حسگرها بر حسب ولتاژ برای ۱۵ نمونه که شامل روغن خالص کنجد، کلزا و آفتابگردان و نیز روغن کنجد ترکیب شده با روغن کلزا و آفتابگردان با سطوح ناخالصی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد، اندازه‌گیری و پاسخ حسگرها برای  $15 \times 15 = 225$  نمونه ثبت شد. میانگین نقطه بیشینه حسگرها در هر گروه در قالب یک توصیف‌کننده برای پاسخ آرایه حسگری در نظر گرفته شد. بنابراین، ماتریس ویژگی  $[225 \times 10]$  به عنوان ورودی روش تحلیل چندمتغیره استفاده شد.

### نتایج آزمایش گازکروماتوگرافی (GC)

میزان اسیدهای چرب روغن تنها یک شاخص به منظور تعیین ارزش غذایی روغن‌های خوارکی

LDA یک روش نظارت شده<sup>۲</sup> برای کاهش ابعاد است و جزو اولین روش طبقه‌بندی است که توسط فیشر (Fisher, 1936) به عنوان یک تحلیل ترکیبی خطی از تمام ویژگی‌های مربوط به یک سری از نمونه‌های طبقه‌بندی شده، به بهینه‌سازی تفکیک‌پذیری میان گروه‌ها، بیشینه واریانس بین گروهی و کمینه واریانس درون گروهی پرداخته می‌شود (Xu *et al.*, 2016). در روش حداقل مربعات جزئی<sup>۳</sup> با کاهش ابعاد داده و حداقل رساندن تعداد بردارهای عمود بر هم، اطلاعات مهم و کاربردی ایجاد می‌شود. رگرسیون خطی ثابت در این مدل  $Y = AX + B$  است که با استخراج ترکیبات خطی از داده‌های اصلی X که اجزای پنهان متعدد نامیده می‌شود، مقادیر ضریب تشخیص<sup>۴</sup> و خطای جذر میانگین مربع‌ها<sup>۵</sup> برای تعیین کمیت توانایی پیش‌بینی مدل از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Geladi & Kowalski, 1986).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad (2)$$

که در آن،  $p_i$  = مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل؛  $a_i$  مقادیر واقعی مدل؛ و n تعداد مقادیر. روش K-نzdیک‌ترین همسایه یک روش یادگیری با نظارت است. در این روش، برای طبقه‌بندی الگوی ورودی، فاصله آن با همه نمونه‌های آموزشی محاسبه شده و K نمونه که از بقیه نمونه‌ها به الگوریتم نزدیک‌تر هستند انتخاب می‌شود. پس از تعیین K دسته از نزدیک‌ترین همسایگی‌ها این مدل به راحتی قادر خواهد بود

1- Supervised

3- R<sup>2</sup>

5- Hyperplane

2- Partial Least Squares

4- Root-Mean-Square Error

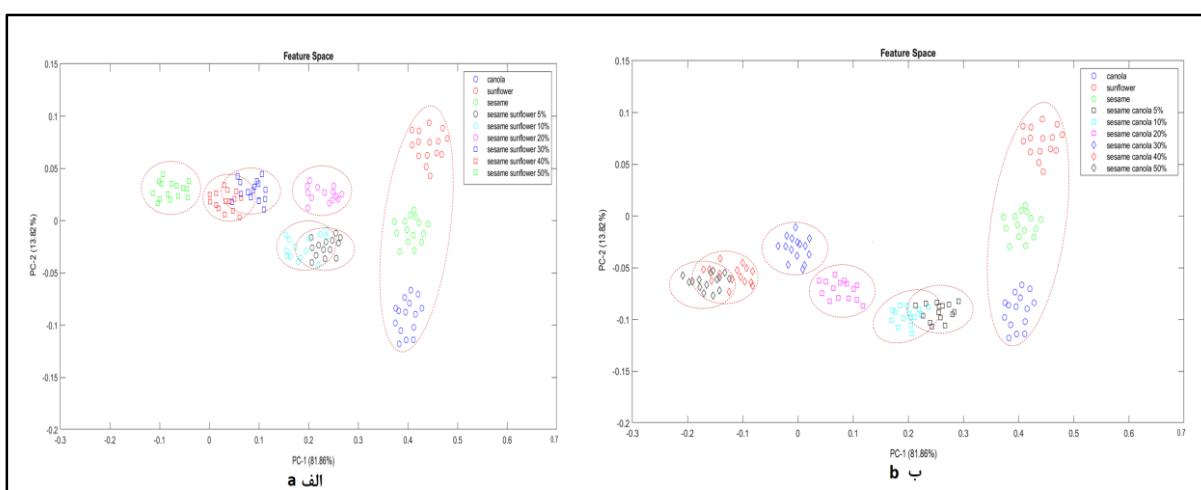
نمونه‌های تقلیبی در محدوده استاندارد مجاز روغن کنجد هستند و با افزودن ناخالصی به روغن کنجد، اسیدهای چرب قابل شناسایی نبوده و در محدوده استاندارد مجاز روغن کنجد قرار می‌گیرند. بنابراین، با تجزیه اسیدهای چرب نمی‌توان ناخالصی روغن کنجد را با روش GC شناسایی کرد و نیازمند به کارگیری روش‌های جایگزین است.

#### نتایج روش PCA

به منظور آشکارسازی ناخالصی در نمونه‌های روغن کنجد از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. نمودار اسکور<sup>۱</sup> مؤلفه‌های اصلی برای آشکارسازی تمایز سطح مختلف روغن کنجد تقلیبی در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از PCA، دو مؤلفه اصلی اول PC1 و PC2 به ترتیب ۸۱/۸۶ و ۱۳/۸۲ درصد گزارش شد که در مجموع ۹۵/۶۸ درصد ورایانس بین نمونه‌های مختلف روغن کنجد تقلیبی را پوشش دادند.

محسوب نمی‌شود بلکه در ترکیب و شناسایی میزان خلوص انواع روغن نیز کاربرد دارد (Malekahmadi *et al.*, 2021). بنابراین تغییر در پروفایل اسیدهای چرب می‌تواند دلیل مخلوط کردن یک روغن با دیگر روغن‌ها باشد (Roy & Yadav, 2021). در این آزمایش شاخص‌های اسیدهای چرب که برای تشخیص ناخالصی روغن کنجد در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: میریستیک (C14:0)، پالمیتیک (C16:0)، پالمیتولئیک (C16:1)، هپتا دکانوئیک (C17:0)، هپتا دسنوئیک (C17:1)، اسٹئاریک (C18:0)، اولئیک (C18:1)، لینولئیک (C18:2)، لینولنیک (C20:0)، آراشیدیک (C20:1)، ایکوزنوئیک (C20:3) و بهینیک (C22:0).

طبق نتایج آزمایش لینولئیک (C18:2) و اولئیک (C18:1) اسید، دو اسید چرب غالب هستند و مقادیر آن به صورت کمی برابر با ۴۰/۸۴ و ۳۸/۱۸ درصد به دست آمد. اسیدهای چرب در اکثر

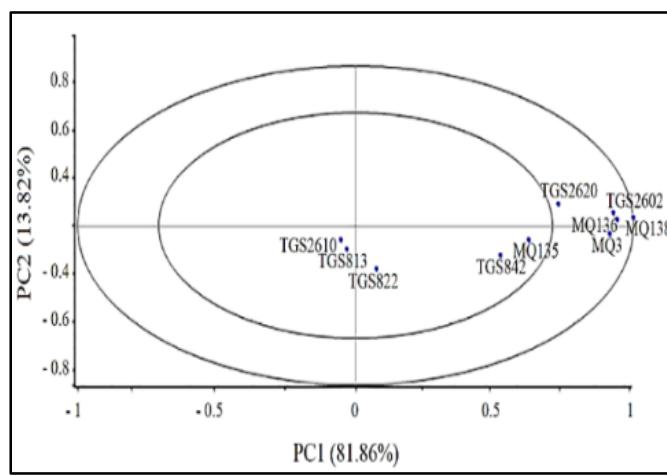


شکل ۳- نمودار امتیاز تحلیل PCA برای سطوح مختلف ناخالصی در روغن کنجد  
(الف: روغن کنجد-آفتابگردان، ب: روغن کنجد-کلنزا)

Fig. 3- PCA analysis score plot for different levels of impurity in sesame oil  
(a: Sesame-sunflower oil, b: Sesame-canola oil)

با مقدار ۹۵ درصد گزارش کردند. در تحقیقی دیگر به منظور تقلب روغن حیوانی خالص با روغن دنبه با روش PCA، توانست ۹۷ درصد واریانس کل داده‌ها را پوشش دهد (Ayari *et al.*, 2020). به منظور درک تأثیر هر یک از حسگرهای برای تحلیل شناسایی الگوی مناسب، از نمودار همبستگی<sup>۱</sup> با ضریب‌های مقادیر ویژه برای تعیین نقش متغیرها (حسگرهای) استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از نمودار لودینگ می‌توان حسگر یا حسگرهایی را که کمترین تأثیر در تشخیص تمایز بین نمونه‌ها دارند، شناسایی و حذف کرد تا هزینه‌های ساخت مربوط به آرایه حسگری سامانه ماشین‌بویایی کاهش یابد. با توجه به شکل ۴، حسگرهای MQ138، MQ2602، TGS2600، MQ3 و MQ135 به ترتیب دارای بیشترین مقدار ضریب لودینگ نسبت به سایر حسگرهای هستند و بنابراین، نقش مؤثری در تمایز و طبقه‌بندی نمونه‌ها دارند.

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، با افزایش میزان ناخالصی، در تمامی نمونه‌های روغن کنجد-آفتتابگردان و کنجد-کلزا در سطوح مختلف تمایز مناسبی وجود دارد به جز نمونه‌های روغن کنجد-آفتتابگردان (شکل ۳-الف) با سطوح تقلب (۵ و ۱۰)، (۳۰ و ۴۰) درصد و روغن کنجد-کلزا (شکل ۳-ب) با نسبت ترکیبی (۵ و ۱۰)، (۴۰ و ۵۰) که مقدار کمی همپوشانی وجود دارد و این همپوشانی ناشی از نزدیک بودن پاسخ حسگرهای در این سطوح ناخالصی است. از آنجایی که ظاهر فیزیکی و رنگ نمونه‌های روغن کنجد با افزایش میزان ناخالصی تغییر نداشته، نمونه‌های روغن کنجد-آفتتابگردان و کنجد-کلزا در سطوح ۵ و ۱۰ درصد به خوبی از یکدیگر متمایز شده‌اند که نشان‌دهنده دقیق بالای حسگرهای در واکنش به تغییرات الگوی بوی نمونه است. زارع‌زاده و همکاران (Zarezadeh *et al.*, 2021) در تشخیص تقلب روغن زیتون این مؤلفه را



شکل ۴- نمودار لودینگ PCA برای نمونه‌های مختلف تقلب روغن کنجد

Fig. 5- Loading diagram of PCA analysis for different levels of sesame oil adulteration

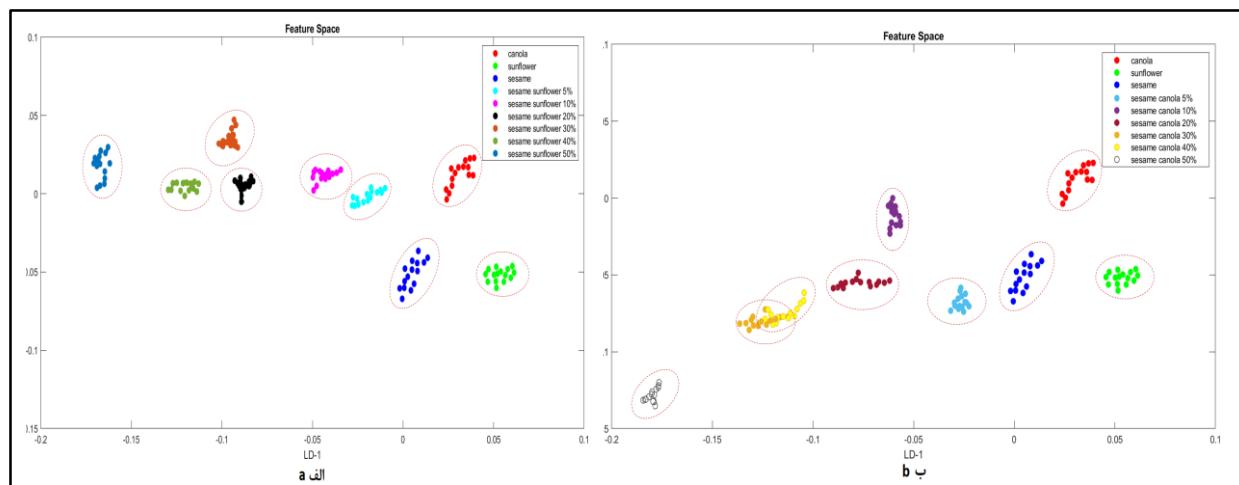
دیده می‌شود، دو مولفه اصلی اول دلالت بر بیشینه مقدار داده‌های اصلی دارد. عملکرد این روش برای تشخیص روغن کنجد در سطوح مختلف تقلب با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع یگانه<sup>۱</sup> تخمین زده

#### نتایج روش LDA

نتایج بررسی روش LDA به منظور طبقه‌بندی گروه‌های مختلف روغن کنجد بر اساس پاسخ آرایه حسگری در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که

به مراکز جدید، گروه‌ها طبقه‌بندی شدند که میزان دقت طبقه‌بندی  $92/30$  درصد گزارش شده است.

شد. دیده می‌شود که با افزایش میزان ناخالصی در روغن کنجد در سطوح پایین  $5$  و  $10$  درصد نمونه‌ها به خوبی از یکدیگر متمایز و با توجه



شکل ۵- نمودار امتیاز تحلیل تفکیک خطی برای سطوح مختلف ناخالصی در روغن کنجد  
(الف: روغن کنجد-آفتاگردان، ب: روغن کنجد-کلزا)

Fig. 6- LDA analysis plot for plot for different levels of impurity in sesame oil  
(a: Sesame-sunflower oil, b: Sesame-canola oil)

صحیح  $92/30$  درصد روغن کنجد را از کلزا و آفتاگردان با سطوح مختلف تقلب جداسازی کند. در تحقیقی، با استفاده از بینی‌الکترونیک برای تشخیص تقلب درصدۀای مختلف پوره کدو در رب گوجه‌فرنگی، نتایج روش LDA، دقت  $79/07$  در طبقه‌بندی الگوهای بوی تقلب را دربرداشت (Mohammad-Razdari *et al.*, 2019). همچنین، زمان رسیدگی گوجه‌فرنگی توسط بینی‌الکترونیک با تعداد  $80$  نمونه بررسی شد که توسط روش LDA حالات مختلف رسیدگی گوجه‌فرنگی به خوبی متمایز شدند و واریانس کل داده‌ها  $88/30$  درصد گزارش شد (Gómez *et al.*, 2006).

در جدول ۲، ماتریس اغتشاش<sup>۲</sup> طبقه‌بندی مربوط به روغن کنجد با روغن کلزا و آفتاگردان در سطوح مختلف تقلب آمده است. برابر این جدول، در نمونه‌های  $7$ ،  $8$  و  $11$  به ترتیب روغن کنجد-کلزا  $30$  درصد، از  $15$  نمونه،  $13$  نمونه به درستی تشخیص داده شده و  $2$  نمونه به اشتباه نامطلوب، کنجد-کلزا  $40$  درصد از  $15$  نمونه  $14$  نمونه به درستی تشخیص و  $1$  نمونه به اشتباه و در نمونه کنجد-آفتاگردان  $10$  درصد،  $14$  نمونه به درستی و یک نمونه در کلاس دیگر طبقه‌بندی شده است. سایر نمونه‌ها به طور کامل ( $100$  درصد) تشخیص داده شده است. بنابراین، مدل توانسته با میزان دقت طبقه‌بندی

جدول ۲- ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی LDA برای سطوح مختلف تقلب روغن کنجد

Table 2- Classification confusion matrix of LDA for various levels of sesame oil adulteration

Predict class															کلاس پیش‌بینی
۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	نمونه‌ها Samples
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۱۵	۰
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۲
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۱۵	۰
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۳
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۴
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۵
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۶
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۷
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۸
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۹
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۰
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۱
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۲
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۳
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۴
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۵
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	۰	۱۵

دقت طبقه‌بندی صحیح 92.30 %

مقادیر پیش‌بینی شده است و هم‌راستا بودن آن را با نتایج نمودار لودینگ نمایش می‌دهد. سرانجام به منظور بررسی عملکرد الگوریتم PLS از شاخص‌های  $R^2$  و RSME استفاده و نقش بالای این دو حسگر ارزیابی شد که نشان می‌دهد PLS حسگرهای MQ138 و TGS2620 در مدل PLS توانایی بالایی به منظور پیش‌بینی طبقه‌بندی نمونه‌های تقلبی روغن کنجد دارند. در این روش، مقادیر شاخص‌های  $R^2$  و RMSE برای این دو حسگر به ترتیب ۰.۹۸۶۳ و ۰.۹۰۱۸ و ۰.۹۶۵۹، ۰.۰۰۲۰ به دست آمد. محمد رزداری و همکاران (2019) (Mohammad-Razdari *et al.*, 2019) با کمک PLS درصدهای مختلف تقلب پوره کدو در رب گوجه‌فرنگی را با دقیقیت ۹۴ درصد طبقه‌بندی کردند. در تحقیقی دیگر، به منظور تعیین درصدهای تقلب شیرین‌کننده‌های تجاری در آب میوه، روش PLS قادر به تشخیص ۹۷/۹۰ درصد نمونه‌ها شد (Mabood *et al.*, 2018).

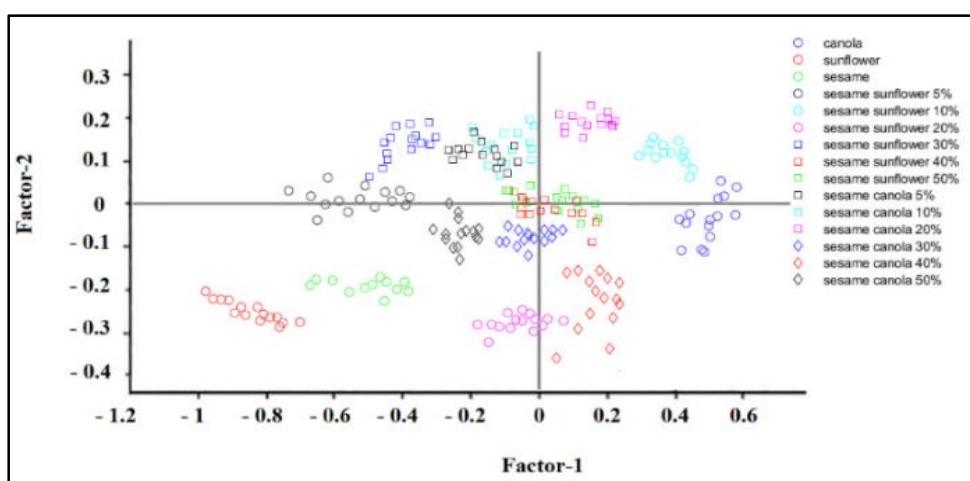
همچنین، به منظور تشخیص تقلب روغن زیتون خالص با نمونه‌های

### نتایج روش PLS

در روش حداقل مربعات جزیی دو مؤلفه اصلی factor-1 و factor-2 به ترتیب ۷۵ و ۱۸ درصد از واریانس داده‌ها و در مجموع ۹۳ درصد واریانس کل داده‌ها را پوشش دادند (شکل ۶). در این روش، نمونه روغن کنجد خالص به صورت آشکار از نمونه‌های تقلبی جداسازی شد. البته میزان تفکیک روغن کنجد خالص نسبت به سایر نمونه‌های تقلبی در مقایسه با روش LDA دقیق‌تر بود. از آنجاکه حسگرهای MQ138 و TGS2602 بیشترین تأثیر را در تشخیص ناخالصی‌های نمونه روغن کنجد در نمودار لودینگ PCA داشتند، بنابراین نتایج پیش‌بینی توسط این حسگرهای برای شناسایی سطوح مختلف تقلب با روش PLS بررسی شد. در شکل ۷، نتایج رگرسیون روش PLS در خصوص پاسخ حسگرهای MQ138 و TGS2602 برای وزن‌های پیش‌بینی شده نمونه‌ها، در مقایسه با وزن‌های واقعی، ارائه شده است. نتایج بیانگر ضریب همبستگی بالایی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و

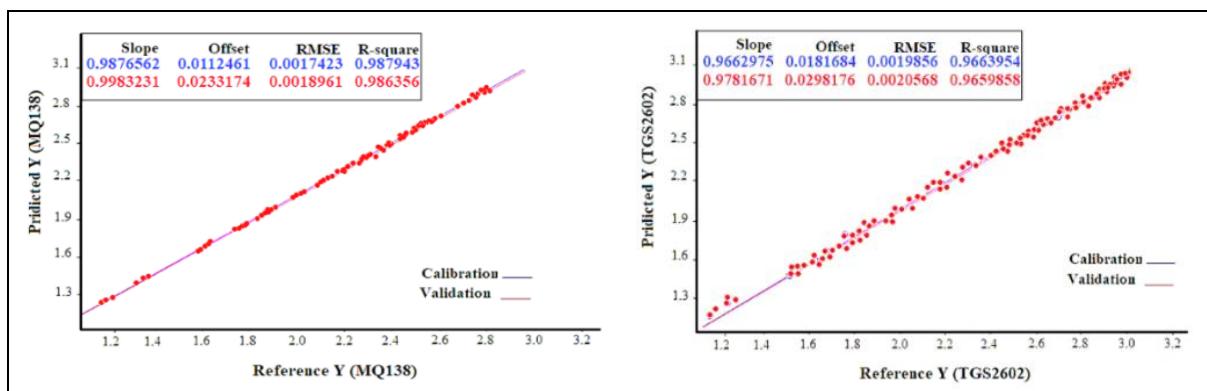
بینی‌الکترونیک با روش PLS نمونه‌ها با دقت ۹۶ درصد پیش‌بینی شدند (Men *et al.*, 2014) نتایج حاصل از این پژوهش و سایر تحقیقات بیانگر کاربردی بودن این روش به منظور تعیین حسگرهای موثر و نیز طبقه‌بندی نمونه‌های مختلف تقلب در موادغذایی است.

روغن کلزا و آفتابگردان توسط روش PLS، مقادیر ضریب همبستگی برای پیش‌بینی نمونه روغن زیتون-کلزا و زیتون-آفتابگردان به ترتیب  $\frac{99}{4}$  و  $\frac{99}{2}$  درصد به دست آمد (Baldwin *et al.*, 2011). در تحقیقی دیگر، به منظور تشخیص تقلب و افروندنی‌های روغن خوراکی توسط زبان و



شکل ۶- نمودار تحلیل PLS برای سطوح مختلف تقلب در روغن خوراکی کنجد

Fig. 6- PLS analysis chart for different levels of sesame oil fraud

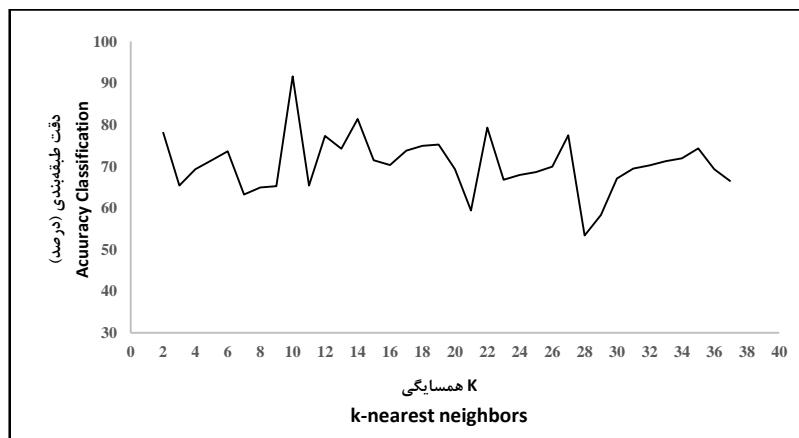


شکل ۷- نتایج رگرسیون روشن PLS در پیش‌بینی پاسخ حسگرهای MQ138 و TGS2620

Fig. 7- Results of PLS regression method in predicting the response of MQ138 and TGS2620 sensors

الگوریتم ۵۰ بار اجرا و در هر بار مقدار دقیت کلی طبقه‌بندی محاسبه شد. شکل ۸ نمودار دقیت طبقه‌بندی به تعداد K نشان داده شده است.

**نتایج روش KNN**  
عملکرد بهینه طبقه‌بندی نمونه‌ها به منظور تعیین مناسب‌ترین مقدار K با نرم‌افزار متلب a 2018a ثبت شد و برای مقادیر K از یک تا ۳۶



شکل ۸- نمودار مقدار کلی دقت طبقه‌بندی برای مقادیر مختلف K

Fig. 8- Graph of the value of total classification accuracy for different values of K

همان‌طور که دیده می‌شود، بالاترین دقت طبقه‌بندی در K=۹ به دست آمد. ماتریس اغتشاش آن برای روغن کنجد در سطوح مختلف تقلب در جدول ۳ محاسبه شد.

همان‌طور که دیده می‌شود، بالاترین دقت طبقه‌بندی در K=۹ به دست آمد. ماتریس اغتشاش آن برای روغن کنجد در سطوح مختلف تقلب در جدول ۳ محاسبه شده است. بر اساس ماتریس اغتشاش، الگوریتم

جدول ۳- ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی KNN برای سطوح مختلف تقلب روغن کنجد

Table 3- Classification confusion matrix of KNN for various levels of sesame oil adulteration

کلاس پیش‌بینی															نمونه‌ها Samples		
Predict class																	
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	1		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	2		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	3		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0	0	4		
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	13	1	0	0	0	5		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	6		
0	0	0	0	0	0	0	1	13	0	1	0	0	0	0	7		
0	0	0	0	0	0	0	13	0	2	0	0	0	0	0	8		
0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	9		
0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10		
0	0	0	0	14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11		
0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12		
0	0	14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13		
0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14		
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15		

جداول  
۳

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به ماتریس اغتشاش برای سطوح مختلف تقلب روغن کنجد با طبقه‌بند KNN  
**Table 4- The values of the statistical indices related to the confusion matrix for different levels of sesame oil with the KNN classifier**

شاخص‌های آماری (%)						کلاس‌ها
AUC	سطح زیرمنحنی	اختصاصی بودن	حساسیت	صحت	دقت	Classes
100	100	100	100	100	100	1
100	100	100	100	100	100	2
100	100	100	100	100	100	3
95.39	97.34	91.21	94.53	90.18		4
93.83	90.35	89.45	93.89	87.34		5
87.35	91.78	90.35	77.68	89.32		6
89.25	93.48	89.66	77.96	88.51		7
91.93	93.24	90.18	93.48	90.11		8
90.24	95.74	87.87	75.34	86.34		9
86.62	91.73	82.35	89.33	84.23		10
88.11	93.89	88.22	80.88	85.28		11
91.34	96.67	89.97	79.52	89.29		12
85.76	88.55	75.56	78.82	83.21		13
92.61	89.36	80.25	88.48	84.16		14
89.66	93.88	90.65	90.10	89.48		15
92.14	94.40	89.71	88	89.83	Mیانگین به ازای هر نمونه (درصد) Average per class (%)	

### نتایج روش SVM

برای طبقه‌بندی نمونه‌های روغن کنجد تقلیبی با روش SVM، از روش C-SVM و Nu-SVM با سه تابع کرنل خطی، پایه‌شعاعی و چندجمله‌ای استفاده شد. مقادیر C، γ و Nu با سعی و خطا و با به حداقل رساندن خطای اعتبارسنجی به دست آمدند. از میان توابع کرنل ذکر شده، در روش C-SVM تابع کرنل پایه‌شعاعی بالاترین دقต را برای طبقه‌بندی نمونه‌ها داشت و مقادیر بهینه پارامترهای C و γ به ترتیب ۰/۲۱ و ۴/۶۴ و میزان دقت آموزش و اعتبارسنجی داده‌ها به ترتیب ۹۶/۳۴ و ۹۰/۵۶ درصد گزارش شد. در روش Nu-SVM، تابع کرنل چندجمله‌ای بیشترین دقت را برای طبقه‌بندی نمونه‌های روغن کنجد تقلیبی داشت که مقادیر Nu و γ به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۱۲۵ و میزان دقت آموزش و اعتبارسنجی داده‌ها به ترتیب ۹۵/۲۳ و ۹۰/۹۴ درصد به دست آمد. نتایج مربوط به این دو روش برای چهار تابع در جدول ۵ ارائه شده است.

طبق جدول ۴، مقادیر میانگین شاخص‌های آماری برای نمونه‌ها به ترتیب ۸۹/۷۱، ۸۹/۸۳، ۸۸، ۹۲/۱۴ و ۹۴/۴۰ درصد به دست آمد. نمونه‌های خالص روغن کنجد، کلزا و آفتابگردان توسط الگوریتم طبقه‌بند K، با دقته ۱۰۰ درصد تشخیص داده شده است. کمترین میزان دقته طبقه‌بندی مربوط به نمونه ۱۳ (کنجد-آفتابگردان ۳۰ درصد) است که میزان شاخص حساسیت و دقته به ترتیب در آن ۷۸/۸۲ و ۸۳/۲۱ درصد است. طاهری و همکاران (Taheri-Garavand *et al.*, 2020) با الگوریتم طبقه‌بند K نمونه مرغ تازه از مرغ منجمد را با میانگین دقته ۹۶/۶۷ درصد طبقه‌بندی کردند. در تحقیقی دیگر، به منظور تشخیص تقلب و طبقه‌بندی روغن زیتون توسط سامانه ماشین بویایی و التراسونیک، با استفاده از طبقه‌بند K، نمونه‌های آزمون با دقته ۹۳/۳۰ درصد طبقه‌بندی شدند (Zarezadeh *et al.*, 2021).

جدول ۵- عملکرد و پارامترهای به دست آمده با ماشین برداریستیبان

Table 5- Performances and parameters obtained by support vector machine

Nu-SVM				C-SVM				تابع کرnel Kernel function
اعتبارسنجدی (درصد) Validation	آموزش (درصد) Train	پارامتر $\gamma$ Parameter $\gamma$	پارامتر Nu	اعتبارسنجدی (درصد) Validation	آموزش (درصد) Train	پارامتر $\gamma$ Parameter $\gamma$	پارامتر C Parameter C	
54.23	68.48	-	0.22	77.43	87.85	-	1.59	خطی Linear
79.65	81.24	0.59	0.22	90.56	96.34	4.64	0.21	پایه شعاعی Radial Basis Function
89.94	95.23	0.125	0.01	68.77	79.08	1.64	0.58	چند جمله‌ای Polynomial

نشان داد در میان مدل‌های طبقه‌بندی، روش C-SVM با تابع کرnel پایه شعاعی بیشترین دقت طبقه‌بندی را دارد و روش‌های تحلیل تفکیک خطی و مدل طبقه‌بندی K-همسایگی نزدیک از لحاظ دقت طبقه‌بندی، به ترتیب بعد از مدل SVM قرار گرفتند. همچنین، از میان حسگرهای به کار رفته در سامانه ماشین‌بويایي، حسگرهای MQ138 و TGS2620 بالاترین کارایی را در طبقه‌بندی نمونه‌های روغن کنجد با سطوح مختلف ناخالصی داشتند. بنابراین، به کمک سامانه ماشین‌بويایي و انتخاب الگوريتم طبقه‌بندی مناسب، امکان تشخیص مقادیر آندک ناخالصی روغن کنجد در حد ۵ درصد نیز وجود دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اسیدهای چرب روغن کنجد در ترکیب با روغن‌های کلزا و آفتابگردان توسط آزمایش GC بررسی و مشخص شدند. برای طبقه‌بندی و تشخیص ناخالصی‌ها در نمونه روغن کنجد، از سامانه ماشین‌بويایي بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی استفاده شد که در مقایسه با روش‌های شیمیایی هزینه‌ پایین‌تری دارد. در این سامانه توسط پاسخ حسگرهای MOS، مبتنی بر روش‌های تحلیل SVM، KNN، PLS، PCA، LDA، DMTغیره اقدام به انتخاب حسگر مناسب، شناسایی الگوی بهینه به منظور طبقه‌بندی و تشخیص روغن کنجد با سطوح مختلف ناخالصی شد. نتایج به دست آمده

### مراجع

- Anon. (2015). *ISIRI 13392, Edible cold pressed oils – specifications & test methods*. 1<sup>st</sup> Revision. Iranian National Standardization Organization. (in Persian)
- Anon. (2019). FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Anon. (2020). Import statistics by tariff code, The Islamic Republic of Iran Customs Administration (IRICA), Available at: <https://irica.ir>. (in Persian)
- Arshak, K., Moore, E., Lyons, G. M., Harris, J., & Clifford, S. (2004). A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *Journal of Sensor Review*, 24(2), 181-198.
- Ayari, F., Mirzaee-Ghaleh, E., Rabbani, H., & Heidarbeigi, K. (2020). Implementation of a Machine Olfaction for the Detection of Adulteration in Cow Ghee. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 129-139. (in Persian)

- Baeten, V., & Aparicio, R. (2000). Edible oils and fats authentication by Fourier transform Raman spectrometry. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 4(4), 196–203.
- Baldwin, E. A., Bai, J., Plotto, A., & Dea, S. (2011). Electronic noses and tongues: Applications for the food and pharmaceutical industries. *Sensors*, 11(5), 4744-4766.
- Beygami, M., Dadgar, B., Eslami, M., & Haghifar, H. (2013). *Investigation and comparison of fatty acid composition and quality characteristics of Iranian and foreign olive oils*. Proceedings of the 21<sup>th</sup> National Congress of Food Science and Technology. Oct. 29-31. Shiraz University, Shiraz, Iran. (in Persian)
- Doleman, B. J., & Lewis, N. S. (2001). Comparison of odor detection thresholds and odor discriminabilities of a conducting polymer composite electronic nose versus mammalian olfaction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 72(1), 41-50.
- Das, S., Sivaramakrishna, M., Biswas, K., & Goswami, B. (2015). A low cost instrumentation system to analyze different types of milk adulteration. *ISA Transactions*, 56, 268-275.
- Esteki, M., Farajmand, B., Kolahderazi, Y., & Simal-Gandara, J. (2017). Chromatographic fingerprinting with multivariate data analysis for detection and quantification of apricot kernel in almond powder. *Food Analytical Methods*, 10(10), 3312-3320.
- Fisher, R. A. (1936). The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, 7(2), 179-188.
- Geladi, P., & Kowalski, B. R. (1986). Partial least-squares regression: a tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 185, 1-17.
- Gómez, A. H., Hu, G., Wang, J., & Pereira, A. G. (2006). Evaluation of tomato maturity by electronic nose. *Computers and Electronics in Agriculture*, 54(1), 44-52.
- Hwang, L. S. (2005). *Sesame oil, bailey's industrial oil and fat products*. Vol. 6. Edited by Fereidoon Shahidi. Six<sup>th</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Hai, Z., & Wang, J. (2006). Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108(2), 116-124.
- Hosseini, H., Minaei, S. & Beheshti, B. (2021). *Feasibility of detection of adulteration in sesame oil using olfaction machine system*. Proceedings of the 13<sup>th</sup> Iranian National Congress on Biosystems Engineering and Mechanization. Sep. 15-17. Tarbiat Modares University. Tehran, Iran. (in Persian)
- Jurs, P. C., Bakken, G. A., & McClelland, H. E. (2000). Computational methods for the analysis of chemical sensor array data from volatile analytes. *Chemical Reviews*, 100(7), 2649-2678.
- Jiang, H., He, Y., & Chen, Q. (2021). Qualitative identification of the edible oil storage period using a homemade portable electronic nose combined with multivariate analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(8), 3448-3456.
- Kiani, S., & Minaei, S. (2015). *Feasibility of using smart systems based on olfactory and visual machines to evaluate the quality and determination of effective ingredients of medicinal plant products (case study: Saffron)*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> National Conference on Herbs and Herbal Medicine. May 28. Shahid Beheshti University, Tehan, Iran. (in Persian)
- Khodamoradi, F., Mirzaee-Ghaleh, E., Dalvand, M. J., & Sharifi, R. (2019). Classification of savory (*Satureja hortensis* L.) based on the level of used urea fertilizer consumed using an olfactory machine. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 35(5), 789-801. (in Persian)
- Lerma-García, M. J., Ramis-Ramos, G., Herrero-Martínez, J. M., & Simó-Alfonso, E. F. (2010). Authentication of extra virgin olive oils by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 118(1), 78-83.
- Loutfi, A., Coradeschi, S., Mani, G. K., Shankar, P., & Rayappan, J. B. B. (2015). Electronic noses for food quality: a review. *Journal of Food Engineering*, 144, 103-111.

- Mildner-Szkudlarz, S., & Jeleń, H. H. (2008). The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive oil with hazelnut oil. *Food Chemistry*, 110(3), 751-761.
- Masella, P., Parenti, A., Spugnoli, P., & Calamai, L. (2010). Nitrogen stripping to remove dissolved oxygen from extra virgin olive oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(12), 1389-1392.
- Men, H., Chen, D., Zhang, X., Liu, J., & Ning, K. (2014). Data fusion of electronic nose and electronic tongue for detection of mixed edible-oil. *Journal of Sensors*, <https://doi.org/10.1155/2014/840685>.
- Mabood, F., Hussain, J., Jabeen, F., Abbas, G., Allaham, B., Albroumi, M., & Farooq, S. (2018). Applications of FT-NIRS combined with PLS multivariate methods for the detection & quantification of saccharin adulteration in commercial fruit juices. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(6), 1052-1060.
- Mohammad-Razdari, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Yoosefian, S. H., Izadi, Z., & Siadat, M. (2019). Potential application of electronic nose coupled with chemometric tools for authentication assessment in tomato paste. *Journal of Food Process Engineering*, 42(5), e13119. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13119>.
- Makarichian, A., Chayjan, R. A., Ahmadi, E., & Zafari, D. (2021). Early detection and classification of fungal infection in garlic (*A. sativum*) using electronic nose. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106575>.
- Malekahmadi, R., Ardakani, S. A. Y., Sadeghian, A., & Eslami, H. (2021). Rapid Detection of Adulteration in Mixing Sesame, Sunflower, and Canola Vegetable Oils by Mathematical Model. *Food Analytical Methods*, 14, 1456–1463. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-01980-y>.
- Nam, Y. S., Noh, K. C., Roh, E. J., Keum, G., Lee, Y., & Lee, K. B. (2014). Determination of edible vegetable oil adulterants in sesame oil using  $^1\text{H}$  nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Analytical Letters*, 47(7), 1190-1200.
- Ozulku, G., Yildirim, R. M., Toker, O. S., Karasu, S., & Durak, M. Z. (2017). Rapid detection of adulteration of cold pressed sesame oil adulterated with hazelnut, canola, and sunflower oils using ATR-FTIR spectroscopy combined with chemometric. *Food Control*, 82, 212-216.
- Olaleye, O. O., & Kukwa, R. E. (2018). Physico chemical properties and chemical constituent characterization of *Moringa oleifera* seed oil from Benue State, Nigeria, extracted using cold and soxhlet method. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 16(3), 1-11.
- Pearce, T. C., Schiffman, S. S., Nagle, H. T., & Gardner, J. W. (2006). Handbook of machine olfaction: electronic nose technology. John Wiley & Sons.
- Peng, D., Bi, Y., Ren, X., Yang, G., Sun, S., & Wang, X. (2015). Detection and quantification of adulteration of sesame oils with vegetable oils using gas chromatography and multivariate data analysis. *Food Chemistry*, 188, 415-421.
- Ramesh, B., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2019). Classification of different iranian rice varieties and frauded rice based on volatile compounds detected by electronic nose method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(3), 595-606. (In Persian)
- Roy, M., & Yadav, B. K. (2021). Electronic nose for detection of food adulteration: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3):846-858. doi: 10.1007/s13197-021-05057-w.
- Seo, H. Y., Ha, J., Shin, D. B., Shim, S. L., No, K. M., Kim, K. S., Lee, K. B. & Han, S. B. (2010). Detection of corn oil in adulterated sesame oil by chromatography and carbon isotope analysis. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87(6), 621-626.
- Shao, X., Li, H., Wang, N., & Zhang, Q. (2015). Comparison of different classification methods for analyzing electronic nose data to characterize sesame oils and blends. *Sensors*, 15(10), 26726-26742.
- Tian, X., Wang, J., & Cui, S. (2013). Analysis of pork adulteration in minced mutton using electronic nose of metal oxide sensors. *Journal of Food Engineering*, 119(4), 744-749.

- Taheri-Garavand, A., Mirzaee-Ghaleh, E., & Ayari, F. (2020). Intelligent Classification of fresh chicken meat from frozen-thawed using olfactory machine. *Food Technology & Nutrition*, 99(17), 13-22. (in Persian)
- Vaclavik, L., Cajka, T., Hrbek, V., & Hajslova, J. (2009). Ambient mass spectrometry employing direct analysis in real time (DART) ion source for olive oil quality and authenticity assessment. *Analytica Chimica Acta*, 645(1-2), 56-63.
- Voss, H. G. J., Mendes Júnior, J. J. A., Farinelli, M. E., & Stevan, S. L. (2019). A prototype to detect the alcohol content of beers based on an electronic nose. *Sensors*, 19(11), 2646.
- Wu, Z., Zhang, H., Sun, W., Lu, N., Yan, M., Wu, Y. & Fan, S. (2020). Development of a low-cost portable electronic nose for cigarette brands identification. *Sensors*, 20(15), 4239. <https://doi.org/10.3390/s20154239>.
- Xu, L., Yu, X., Liu, L., & Zhang, R. (2016). A novel method for qualitative analysis of edible oil oxidation using an electronic nose. *Food chemistry*, 202, 229-235.
- Ye, T., Jin, C., Zhou, J., Li, X., Wang, H., Deng, P., & Xiao, X. (2011). Can odors of TCM be captured by electronic nose? The novel quality control method for musk by electronic nose coupled with chemometrics. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 55(5), 1239-1244.
- Zarezadeh, M. R., Aboonajmi, M., Ghasemi Varnamkhasti, M., & Azarikia, F. (2021). Estimation of the best classification algorithm and fraud detection of olive oil by olfaction machine. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 371-383. (in Persian)
- Zhang, Q., Liu, C., Sun, Z., Hu, X., Shen, Q., & Wu, J. (2012). Authentication of edible vegetable oils adulterated with used frying oil by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Food Chemistry*, 132(3), 1607-1613.
- Zhang, L., Shuai, Q., Li, P., Zhang, Q., Ma, F., Zhang, W., & Ding, X. (2016). Ion mobility spectrometry fingerprints: A rapid detection technology for adulteration of sesame oil. *Food chemistry*, 192, 60-66.
- Zhu, J., Agyekum, A. A., Kutsanedzie, F. Y., Li, H., Chen, Q., Ouyang, Q., & Jiang, H. (2018). Qualitative and quantitative analysis of chlorpyrifos residues in tea by surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) combined with chemometric models. *Lwt*, 97, 760-769.

## Research Paper

# Evaluation of Pattern Recognition for Detecting Adulteration in Sesame Oil using Machine Olfaction System Based on Multivariate Analysis

H. Hoseini, S. Minaei\* and B. Beheshti

\*Corresponding Author: Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: minaee@modares.ac.ir

Received: 1 November 2021, Accepted: 9 January 2022

<http://doi: 10.22092/AMSR.2022.356371.1400>

### Abstract

Sesame oil which is one of the most popular and expensive edible oils, is prone to adulteration. High price of Sesame oil has motivated adulterers to mix the high-quality Sesame oil with low-quality, less expensive vegetable oils. In this study, the fatty-acid profiles of sesame, rapeseed, sunflower oil samples as well as their mixtures (0, 5, 10, 20, 30, 40 and 50% levels) were determined using Gas Chromatography. Also, Machine olfaction system containing 10 MOS sensors was utilized for detection experiments. Sensor response patterns were used for analyzing and recognizing pattern of electronic-nose signals using multivariate data analysis, including Principal Component Analysis (PCA), Linear Discriminant Analyses (LDA), Partial Least Squares (PLS), K-Nearest Neighbors (KNN) and Support Vector Machine (SVM). Results of the SVM with RFB kernel in C-SVM method had the highest classification accuracy. The accuracy of training and validation were 96.34 and 90.56%, respectively, and next were LDA and KNN models with classification accuracies of 92.30% and 89.94%, respectively. In the light of these results, the proposed models along with the measurement system represent excellent tools for the detection of sesame seed oil adulteration with cheaper vegetable oils.

**Keywords:** Edible Oil, Electronic Nose, Non-Destructive, Olfactometry, Principal Component Analysis



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)