



## قابلیت بینی الکترونیک با حسگرهای اکسید فلزی تحت مدولاسیون دمایی در تشخیص منشاء جغرافیایی ادویه‌جات

مجتبی توحیدی<sup>۱</sup>، مهدی قاسمی ورنامخواستی<sup>۲\*</sup>، مهدی قاسمی نافچی<sup>۳</sup>، مجتبی نادری بلداجی<sup>۴</sup>، فائزه جمالیزاده<sup>۵</sup>، سید محمد صفی الدین اردبیلی<sup>۶</sup>، مهدی خانی<sup>۷</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۳. استادیار، گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۴. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۵. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۶. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۷. استادیار، گروه مهندسی مکانیزاسیون، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۶/۳۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۳)

### چکیده

ادویه علاوه بر تاثیر در طعم و کیفیت مواد غذایی، به دلیل خواص ضد میکروبی یا آنتی اکسیدانی عمر ماندگاری مواد غذایی را نیز افزایش می‌دهد. گونه‌های مختلف ادویه‌ها بر اساس محل رویش، کیفیت و ارزش اقتصادی متفاوتی دارند. بنابراین طبقه‌بندی و جداسازی آن‌ها بر اساس منشأ جغرافیایی مورد توجه مصرف‌کنندگان و فروشندگان بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش توانایی کاربرد بینی الکترونیک بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی به‌عنوان ابزاری غیرمخرب برای تشخیص منشأ جغرافیایی (هند، چین و پاکستان) سه ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه مورد مطالعه قرار گرفت. مدولاسیون دمایی به‌صورت الگوی ولتاژ سینوسی انجام شد و پاسخ گذرای حسگرها برای تحلیل داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل تفکیک خطی (LDA)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) روش‌هایی بودند که برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تصویر داده‌ها با استفاده از روش PCA به‌صورت کاملاً واضح خوشه‌های مجزایی را بر روی فضای تغییر شکل یافته PC ایجاد کرد. با کاربرد روش‌های LDA، SVM و ANN در تفکیک بر اساس منشأ جغرافیایی برای هر سه ادویه، دقت طبقه‌بندی ۱۰۰٪ به‌دست آمد. هم‌چنین از صحت‌سنجی مدل‌های مذکور دقت ۱۰۰٪ حاصل گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بینی الکترونیک مبتنی بر حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی تحت مدولاسیون دمایی در ترکیب با روش‌های کمومتریکس (شیمی سنجی) می‌تواند ابزار موثر و کارآیی در طبقه‌بندی سریع و غیرمخرب نمونه‌های فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه بر اساس منشأ جغرافیایی باشد.

واژه‌های کلیدی: بینی الکترونیک، مدولاسیون دمایی، ادویه.

## ۱. مقدمه

است.

روش تست پنل یک روش ارزیابی حسی است که توسط کارشناسان متخصص انجام می‌شود و دارای جنبه‌های ذهنی است. بنابراین دقت و قابلیت تکرار پذیری آن کم بوده و تحت تاثیر عوامل خارجی می‌باشد و کمی‌سازی ارزیابی‌ها در این روش مشکل است [۴]. روش‌های آزمایشگاهی مانند کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا (HPLC) با آن که نوع و میزان ترکیبات آلی فرار نمونه‌ها را مشخص می‌کند و دارای دقت بالایی است ولی بسیار پر هزینه است [۵].

بینی الکترونیک یکی از روش‌های نوین در سنجش کیفیت مواد غذایی است که به وسیله یک آرایه از حسگرهای غیراختصاصی، سعی در تشخیص و تفکیک بوهای پیچیده متصاعد شده از نمونه‌ها دارد [۶] و پژوهشگران زیادی استفاده از این روش در صنایع غذایی را پیشنهاد کرده‌اند [۷-۱۰]. در بین الکترونیک از حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای پلیمری آلی هادی (CP)<sup>۱</sup>، کریستال‌های پیزوالکتریک (BAW)<sup>۲</sup> و SAW<sup>۳</sup>، نیمه هادی‌های اکسید فلزی (MOS)<sup>۴</sup> و نیمه هادی‌های اکسید فلز ترانزیستور اثر میدان (MOSFET)<sup>۵</sup> استفاده می‌شود که در این میان حسگرهای نیمه هادی اکسید فلزی با توجه به قیمت پایین و حساسیت بالا برای مواد بیولوژیکی مانند محصولات کشاورزی و مواد غذایی از محبوبیت بسیار بالایی برخوردار هستند [۱۱]. توان مصرفی بالا، انتخاب‌گری پایین، زمان بازیابی آهسته و زمان پاسخ طولانی از چالش‌های موجود در استفاده از این نوع حسگرها می‌باشند [۱۲]. زمان بازیابی آهسته حسگر یک محدودیت برای آن در تشخیص سریع گازها می‌باشد. مدولاسیون دمایی<sup>۶</sup> یک راهکار برای حل این مشکل است [۱۳]. در این روش حسگر از نظر دمایی در یک حالت نامتعادل قرار می‌گیرد و وابستگی حساسیت آن به دما منجر به تولید پاسخ‌های حاوی اطلاعات تشخیصی می‌شود.

بدین صورت که دمای لایه حساس حسگر با اعمال الگوی

ادویه‌ها به‌عنوان بخشی از گیاهان معطر که به‌صورت کامل یا شکسته و خرد شده استفاده می‌شوند و نقش قابل توجهی در تغذیه روزانه دارند. امروزه ادویه‌ها به‌عنوان یکی از متداول‌ترین طعم‌دهنده‌ها با منشاء طبیعی در تهیه و فراوری مواد غذایی کاربرد فراوان دارند و نقش حیاتی در زندگی روزمره انسان‌ها دارند و از خواص تغذیه‌ای، آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و دارویی آن‌ها در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شود. هم‌چنین استفاده از این مواد باعث افزایش سوخت و ساز بدن و تسریع در هضم مواد غذایی در دستگاه گوارش شده، اختلال در هضم را بهبود بخشیده و در کاهش کلسترول خون تاثیر مثبتی ایفا می‌کنند [۱].

تغییرات کیفیت و ترکیب ادویه‌ها حتی در مقادیر کم، موجب تاثیر ناخواسته‌ای بر مواد غذایی می‌شود. بنابراین کنترل کیفیت به‌منظور حفظ رضایت و حقوق مصرف‌کنندگان ضروری است. با این حال، ترکیب شیمیایی ادویه‌ها بسیار پیچیده است و می‌تواند به دلیل شرایط آب و هوایی و شرایط محل رشد آن‌ها متفاوت باشد [۲]. هر کدام از انواع ترکیبات آلی فرار مربوط به بوی خاصی هستند و با توجه به این حقیقت که درصد ترکیبات تشکیل دهنده بر کیفیت بوی محصولات تاثیر می‌گذارد، از این ویژگی می‌توان برای شناسایی ارقام مختلف ادویه بر اساس منشاء جغرافیایی استفاده کرد [۳]. ادویه‌ها در کشورهای مختلفی از جمله کشورهای هندوستان، پاکستان، چین و کشورهای آسیای شرقی و جنوبی به‌صورت بومی خودرو و کشت شده تولید می‌شوند. این ادویه‌ها با توجه به منطقه جغرافیایی دارای درجه کیفیت‌های متفاوتی هستند. به‌عنوان مثال ادویه‌های هندی در میان سایر ادویه‌ها دارای بالاترین میزان خلوص و کیفیت هستند و قیمت بالاتری نسبت به سایر ادویه‌ها دارند. بنابراین تشخیص، جداسازی و دسته‌بندی ادویه‌ها از نظر منشاء جغرافیایی از اهمیت بالایی برخوردار است.

امروزه از روش‌های تحلیلی مختلفی برای شناسایی کیفیت و ارقام مختلف ادویه‌ها استفاده می‌شود، اما اغلب آن‌ها گران و وقت‌گیر هستند. بنابراین نیاز به استفاده از ابزار نوین، کم هزینه، سریع و قابل اطمینان مانند بینی‌های الکترونیک احساس می‌شود و بررسی منابع نیز با تاکید بر کاربرد این روش نگارش شده

1. Conducting Polymer  
 2. Bulk Acoustic Wave  
 3. Surface Acoustic Wave  
 4. Metal Oxide Semiconductor  
 5. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor  
 6. Temperature Modulation

ترکیبات خاصی از مواد فرار نمونه‌ها واکنش نشان می‌دهند. از ویژگی بارز این نوع حسگرها می‌توان به عمر زیاد، پاسخ بسیار پایین به رطوبت، پایداری شیمیایی بالا و قیمت پایین اشاره نمود [۲۰]. در جدول (۱) به مشخصات حسگرهای مورد استفاده در این سامانه اشاره شده است. همچنین به منظور پایش همزمان دما و رطوبت نسبی محفظه حسگری، از حسگر SHT75 Humidity & temperature sensor, Sensirion, Zurich, (Switzerland) استفاده شد. این حسگر یک تراشه دما و رطوبت کاملا کالیبره شده با کیفیت بالا، خروجی دیجیتال و توان مصرف پایین می‌باشد [۲۱].

طبق پژوهش‌های قبلی [۲۲]، تمامی حسگرها در یک محفظه آب‌بند شده از جنس تفلون قرار داده شده‌اند. ورودی این محفظه توسط لوله پنوماتیکی به خروجی محفظه نمونه متصل شده و بوی متصاعد شده از نمونه در فضای فوقانی محفظه نمونه توسط پمپ با دبی ۱/۳ lit/min از طریق این مجرا به محفظه حسگرها منتقل می‌شود. همچنین به منظور اطمینان از عملکرد صحیح حسگرها، ۳۰ min قبل از شروع آزمایش‌ها، مجموعه حسگرها توسط یک بورد واسط شروع به کار کرده تا به پایداری دمایی برسد [۲۳]. در پژوهش‌های پیشین ولتاژ ثابت ۵V به ریزگرمنگن حسگرها اعمال شده و پس از تزریق بو به محفظه حسگری، از پاسخ حالت پایدار حسگرها به منظور تحلیل نتایج استفاده می‌شد [۱۹، ۲۲، ۲۳]، اما در این پژوهش و برای مدولاسیون دمایی، الگوی ولتاژی به صورت تابع سینوسی با دامنه ۵-۰ V و فرکانس ۰/۰۲۵ Hz به ریزگرمنگن حسگرها اعمال شد (شکل ۱). سپس پاسخ حسگرها به عنوان پاسخ گذرا به وسیله یک سامانه تحویل داده (NI USB- (National Instruments Corporation, USA) 6009 برنامه ریزی شده با نرم افزار LabView2013 جمع آوری و ذخیره شد.

### ۳.۲. راهبرد تحلیل داده

#### ۱.۳.۲. پیش پردازش داده‌ها

داده‌های بینی الکترونیک متشکل از سری‌های زمانی پاسخ حسگرها تحت مدولاسیون دمایی در مدت زمان ۴۰s ثبت و ذخیره شد. بررسی پاسخ‌ها نشان داد که حسگر TGS2602 در هنگام انجام قسمتی از آزمایش‌ها دچار مشکل شده و از کار افتاده است. بنابراین در تحلیل داده‌ها از بررسی پاسخ‌های مربوط به این

بدین صورت که دمای لایه حساس حسگر با اعمال الگوی ولتاژی متفاوت به ریزگرمنگن آن، تغییر داده می‌شود. تغییر دمای سطح حساس نیز منجر به تغییر خواص فیزیکی- شیمیایی آن می‌گردد [۱۴]. به عنوان مثال افزایش حساسیت و انتخاب‌گری حسگرها پس از استفاده از مدولاسیون دمایی از جمله یافته‌هایی است که توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [۱۳، ۱۷-۱۵]. همچنین استفاده از پاسخ گذرای حسگرها به جای پاسخ حالت پایدار آن با کاهش زمان اندازه‌گیری، منجر به کاهش توان مصرفی حسگرها می‌شود [۱۸].

با توجه به جستجوهای به عمل آمده در منابع علمی، تاکنون پژوهشی در رابطه با کاربرد مدولاسیون دمایی در بینی الکترونیکی در بررسی منشاء جغرافیایی ادویه‌ها در دنیا گزارش نشده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی قابلیت سامانه بینی الکترونیکی بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی تحت اثر مدولاسیون دمایی در تشخیص منشاء جغرافیایی برای سه ادویه پر مصرف زردچوبه، دارچین و فلفل سیاه می‌باشد.

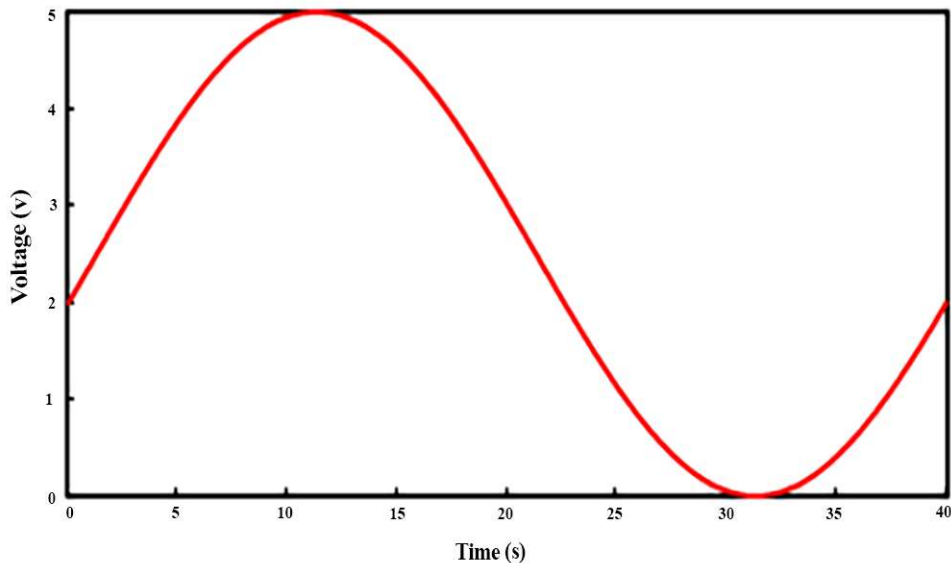
## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش با منشاء جغرافیایی متفاوت جمع‌آوری شدند. نمونه‌های زردچوبه، فلفل سیاه و دارچین از نمونه‌های ادویه با منشاء جغرافیایی هندی، پاکستانی و چینی موجود در بازار ایران تهیه شدند. به منظور حصول اطمینان از کیفیت نمونه‌ها، ادویه‌های ذکر شده ابتدا به صورت فله و پودر نشده تهیه شده و سپس آسیاب و به پودر تبدیل شدند.

### ۲.۲. بینی الکترونیکی

در این پژوهش به منظور تشخیص منشاء جغرافیایی ادویه‌جات، از بینی الکترونیک ساخته شده در دانشگاه شهرکرد استفاده شد [۱۹]. این سامانه از قسمت‌های محفظه نمونه‌گیری، آرایه حسگری، شیرهای قطع و وصل، پمپ، سامانه تحویل و ثبت داده، کپسول اکسیژن و الگوریتم‌های تشخیص و تحلیل داده تشکیل شده است. آرایه حسگری مورد استفاده در این سامانه شامل هشت حسگر گازی بر پایه نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOS) با نام‌های تجاری TGS813، TGS822، TGS2602، TGS2620، MQ3، MQ4، MQ135 و FIS می‌باشد که هر کدام از آن‌ها به



شکل (۱) الگوی ولتاژی اعمال شده به ریزگرمنک حسگرها تحت مدولاسیون دمایی

Fig. 1 The voltage pattern applied to micro-heater of the sensors under temperature modulation

جدول (۱) نام، مشخصات و محدوده تشخیص حسگرهای مورد استفاده در بینی الکترونیکی.

Table 1 Sensors used in electronic nose, main applications and detection ranges.

محدوده تشخیص (ppm) Detection range (ppm)	کاربردهای اصلی Main applications	نام حسگر Sensor Name
500-10000	متان، پروپان، بوتان	TGS813
50-5000	بخار حلال‌های آلی	TGS822
1-30	سولفید هیدروژن، آمونیاک، تولوئن	TGS2602
50-5000	بخار حلال‌های آلی	TGS2620
0.05-10	الکل	MQ3
200-10000	متان، گاز طبیعی	MQ4
10-300	آمونیاک، الکل، دود، بنزن و دی اکسید کربن	MQ135
1-10 (سولفید هیدروژن)	کنترل کیفیت هوا	FIS(Sp3-aq2)

مدل‌سازی، داده‌ها با استفاده از تبدیل متغیر نرمال استاندارد (SNV) نرمال‌سازی شدند. SNV یک روش نرمال‌سازی داده است که با تبدیل داده‌ها به میانگین صفر و انحراف استاندارد واحد، داده‌ها را نرمال می‌کند و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$Z = \frac{X - \text{mean}(X)}{\text{std}(X)} \quad (1)$$

که در آن  $X$  بردار داده‌های اولیه،  $\text{mean}(X)$  میانگین  $X$ ،  $\text{std}(X)$  انحراف معیار  $X$  و  $Z$  متغیر نرمال شده می‌باشد. لازم به ذکر است که قبل از انجام تحلیل‌ها ۳۰٪ از داده‌ها جداسازی شد و تحلیل‌ها با ۷۰٪ داده‌های باقیمانده از مجموعه داده انجام شد.

حسگر صرف‌نظر شد. با توجه به نرخ نمونه‌برداری ۵ داده در ثانیه، در مدت زمان ۴۰s تعداد ۲۰۱ داده ثبت گردید. از آن‌جا که هفت حسگر گازی مختلف در آرایه حسگری استفاده شده است، تعداد کل داده‌های ثبت شده برای یک نمونه خاص  $7 \times 201 = 1407$  بود. هم‌چنین برای هر منشأ جغرافیایی تعداد ۱۶ تکرار در آزمایش انجام شد. بنابراین برای سه منشأ جغرافیایی (چین، هند و پاکستان) تعداد  $3 \times 16 = 48$  داده ثبت گردید. در نهایت برای هر یک از سه ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه یک مجموعه داده با تعداد  $48 \times 1407 = 67536$  داده ثبت شد.

از آن‌جا که در این سامانه هفت حسگر گازی مختلف استفاده شده است، برای جلوگیری از هر گونه انحراف و پیش‌خطا در

از توابع کرنل مختلف مانند کرنل خطی، چند جمله‌ای، تابع پایه شعاعی و تابع سیگموئید، می‌توان از این روش در طبقه‌بندی غیر خطی داده‌ها نیز استفاده نمود [۲۸].

#### ۵.۳.۴. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

یک شبکه عصبی مصنوعی ایده‌ای است برای پردازش اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد. این شبکه‌ها توانایی بالایی در استنتاج معانی از داده‌های پیچیده یا مبهم داشته و می‌توانند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر روش‌های کامپیوتری بسیار پیچیده و دشوار است به کار گرفته شوند [۲۹]. در دهه اخیر استفاده از این روش داده‌کاوی در زمینه‌های گوناگونی از قبیل طبقه‌بندی محصولات کشاورزی گسترش یافته است [۳۰]. شبکه عصبی به‌عنوان یکی از روش‌های کمومتریکس از پتانسیل بالایی برای تحلیل سیگنال-های حسگرهای بینی الکترونیکی برخوردار هستند [۳۱]. ساختار یک شبکه عصبی از سه لایه تشکیل شده است، لایه ورودی، لایه مخفی و لایه خروجی. تعداد نرون‌های لایه ورودی، مخفی و خروجی به ترتیب بستگی به تعداد بردار ویژگی‌های ورودی، پیچیدگی مسئله طبقه‌بندی و تعداد کلاس‌های خروجی دارد. در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) با توابع فعال‌سازی tansig و purelin به ترتیب در لایه مخفی و لایه خروجی و الگوریتم آموزشی لوبز-مارکوارت استفاده شد. داده‌ها به سه قسمت آموزش، آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب با نسبت ۷۰، ۱۵ و ۱۵٪ تقسیم شدند. ساختار یک ANN از جمله موارد موثر در دقت طبقه‌بندی این شبکه‌ها می‌باشد. بدین منظور ساختارهای مختلف شبکه ارزیابی شد. برای بررسی عملکرد شبکه عصبی در طبقه‌بندی منشاء جغرافیایی ادویه‌ها و انتخاب بهترین ساختار شبکه در بین ساختارهای مختلف از شاخص آماری نرخ صحیح طبقه‌بندی بر اساس رابطه (۲) استفاده شد.

$$CCR(\%) = \frac{N_{\text{right}}}{N} \times 100 \quad (2)$$

که  $N_{\text{right}}$  تعداد نمونه‌هایی است که به‌طور صحیح طبقه‌بندی شده‌اند،  $N$  تعداد کل نمونه‌ها در یک طبقه و  $CCR$  بیانگر نرخ طبقه‌بندی صحیح است. انتخاب داده‌ها برای سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و تست مدل‌ها به‌صورت تصادفی و از کل محدوده

انتها برای صحت‌سنجی مدل‌های ایجاد شده از این مجموعه داده ۳۰٪ استفاده شد.

#### ۲.۳.۲. تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)

PCA یک روش آماری چند متغیره برای کاهش ابعاد داده‌ها، استخراج ویژگی‌ها و هم‌چنین تشخیص الگو است و به‌طور گسترده در تحلیل داده‌های بینی الکترونیک استفاده شده است [۲۴-۲۶]. در این تکنیک داده‌ها با استفاده از یک تبدیل خطی بر اساس حداکثر واریانس و حداقل از فضا چند بعدی به مختصات دیگری بر اساس مولفه‌های اصلی منتقل می‌شوند. با استفاده از این روش می‌توان به تعداد متغیرهای مسئله، مولفه اصلی مستقل استخراج نمود ولی به‌طور معمول از چند مولفه اصلی اول که درصد قابل قبولی از واریانس بین داده‌ها را توجیه می‌کنند استفاده می‌شود [۱۸].

#### ۳.۳.۲. تحلیل تفکیک خطی (LDA)

تحلیل تفکیک خطی یک روش متداول آماری تحت نظارت است که به‌طور معمول برای پیدا کردن ترکیب خطی خصوصیتی که به بهترین صورت دو یا چند کلاس را به گونه‌ای که توزیع نرمال و پراکندگی یکسانی داشته باشند از هم جدا می‌کند، استفاده می‌شود. هدف این تحلیل، تصویر نمونه‌ها از فضای  $N$  بعدی به یک خط است. برای مسائلی با  $K$  کلاس، تعداد  $N$  بعدی به یک خط  $m = m(K-1, N)$  خط مورد نیاز است. بنابراین می‌توان گفت تصویر کردن نمونه‌ها با تعداد  $m$  تابع خطی قابل انجام است. در این روش به‌منظور بهینه‌کردن تفکیک‌پذیری بین گروه‌ها، واریانس بین گروهی بیشینه و واریانس درون گروهی کمینه می‌شود [۲۰].

#### ۴.۳.۲. ماشین بردار پشتیبان (SVM)

SVM یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کورتس و وپنیک برای حل مسائل دو کلاسه ارائه شد و اکنون در زمینه‌های طبقه‌بندی، خوشه‌بندی و مدل‌سازی رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷]. اگر داده‌ها به‌صورت خطی قابل جداسازی باشند از ماشین‌های خطی برای تولید یک سطح بهینه که داده‌ها را بدون خطا و با حداکثر فاصله-ی میان صفحه و نزدیک‌ترین نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک می‌نماید، استفاده می‌شود. در غیر این صورت با استفاده

داده‌ها صورت پذیرفت.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. پاسخ حسگرها

در شکل (۲) میانگین پاسخ حسگرها برای نمونه‌های فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه (با سه منشأ جغرافیایی چین، هند و پاکستان) در هنگام اعمال الگوی ولتاژ سینوسی در مدت زمان ۴۰s نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ حسگرها نسبت به نمونه‌ها با منشأ جغرافیایی متفاوت، الگوی تقریباً مشابهی دارند اگرچه در بعضی نواحی تفاوت‌هایی نیز وجود دارد. برای نمونه‌های فلفل سیاه، میانگین پاسخ حسگرهای FIS و MQ4 در بازه انتهایی زمان اندازه‌گیری برای هر سه منشأ جغرافیایی با یکدیگر متمایز می‌باشند (شکل ۲-a). برای نمونه‌های دارچین، همپوشانی الگوی به‌دست آمده از پاسخ حسگرها بیش‌تر از حالت قبل می‌باشد اگرچه به ترتیب در بازه انتهایی و ابتدایی پاسخ حسگرهای MQ4 و TGS813، تمایز پاسخ‌ها مخصوصاً برای منشأ جغرافیایی چین از هند و پاکستان دیده می‌شود (شکل ۲-b). این تمایز در پاسخ حسگرها برای نمونه‌های زردچوبه بیش‌تر است، به گونه‌ای که میانگین پاسخ حسگرهای MQ3 و MQ4 در کل زمان اندازه‌گیری برای هر سه نوع زردچوبه هندی، چینی و پاکستانی کاملاً از هم متمایز می‌باشند (شکل ۲-c). در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر تفاوت‌های موجود در داده‌ها، از روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شد.

#### ۳.۲. تحلیل مولفه اصلی

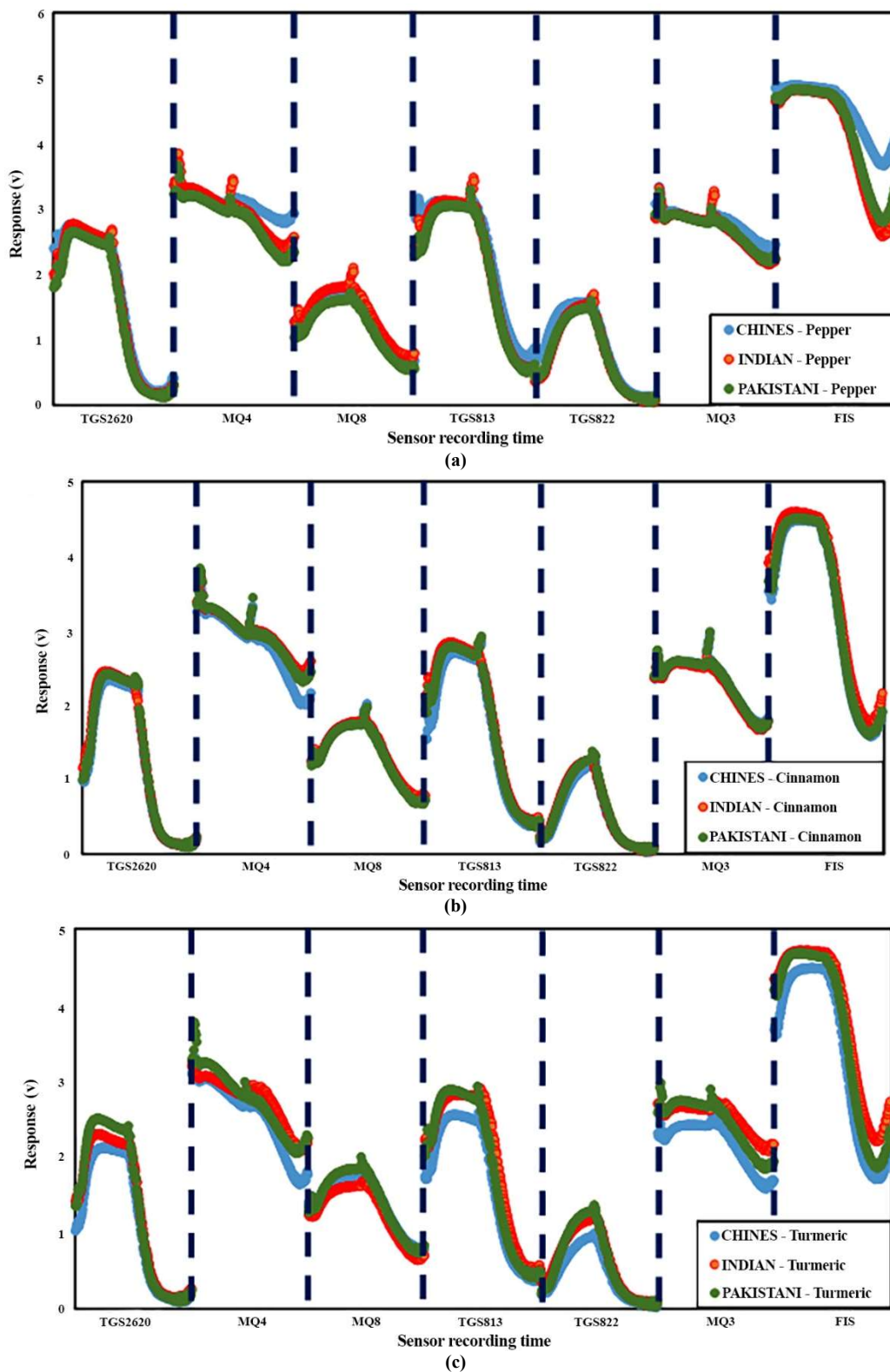
به‌منظور تشخیص منشأ جغرافیایی در نمونه‌های سه نوع ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از روش PCA استفاده شد. این روش بدون در اختیار داشتن اطلاعاتی از طبقه‌بندی نمونه‌ها، پیچیدگی مجموعه داده‌ها را کاهش داده و با استفاده از واریانس داده‌ها و مولفه‌های اصلی برای تمایز بین گروه‌های مختلف در فرایند تشخیص الگو استفاده می‌شود. در شکل (۳) نمودارهای اسکور به‌دست آمده از تحلیل PCA بر اساس مولفه‌های اصلی اول و دوم (PC1 و PC2) برای هر سه نوع ادویه را نشان داده است. این دو مولفه اصلی بر بیشینه مقدار واریانس در داده‌ها دلالت می‌کنند. این نتایج بیانگر

تفکیک‌پذیری بسیار خوب هر سه نوع ادویه بر اساس منشأ جغرافیایی است. نتایج این تحلیل برای نمونه‌های فلفل سیاه و زردچوبه در شکل‌های (۳-a) و (۳-b) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌های چینی، هندی و پاکستانی فلفل سیاه و زردچوبه به‌طور کامل از یکدیگر مجزا شدند و دو مؤلفه اصلی اول ۹۴٪ واریانس مجموعه داده‌ها ( $PC2=0.11$ ) و  $PC1=0.83$  را در تفکیک سه منشأ جغرافیایی توصیف کرده‌اند. هم‌چنین برای نمونه‌های دارچین دو مولفه‌ی اصلی PC1 و PC2 به ترتیب ۶۹٪ و ۱۲٪ واریانس بین نمونه‌ها و در مجموع ۸۱٪ واریانس کل را توصیف کردند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمایز مناسبی بین نمونه‌ی هندی با دو نمونه‌ی دیگر و تفکیک-پذیری بالایی بین هر سه نمونه وجود دارد (شکل ۳-c). کارمونا و همکاران با استفاده از بینی الکترونیک تفکیک‌پذیری یازده نمونه مختلف زعفران گردآوری شده از چهار کشور ایران، اسپانیا، مراکش و یونان را بر اساس منشأ جغرافیایی بررسی کردند. نتایج آن‌ها با تحلیل PCA تفکیک بسیار خوب نمونه‌های زعفران بر اساس چهار منشأ جغرافیایی را نشان داد [۳۲].

#### ۳.۳. طبقه‌بندی داده‌ها

تحلیل تفکیک خطی LDA نیز به منظور بررسی کارایی سامانه در تشخیص و تفکیک بین بوهای فرار متصاعد شده از نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۴) نتایج حاصل از روش LDA با استفاده از اعتبارسنجی متقابل با یک نمونه خارج شده برای نمونه‌های فلفل سیاه و دارچین و زردچوبه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها به خوبی از یکدیگر جدا شده‌اند و این تحلیل با دقت ۱۰۰٪ این نمونه‌ها را بر اساس سه منشأ جغرافیایی چین، هند و پاکستان طبقه‌بندی نموده است. بایی و همکاران نمونه‌های مختلف سیر جمع‌آوری شده از هشت منشأ جغرافیایی متفاوت را با استفاده از بینی الکترونیک و روش تفکیک الگوی LDA با دقت بالا پیش‌بینی و طبقه‌بندی نمودند [۳۳].

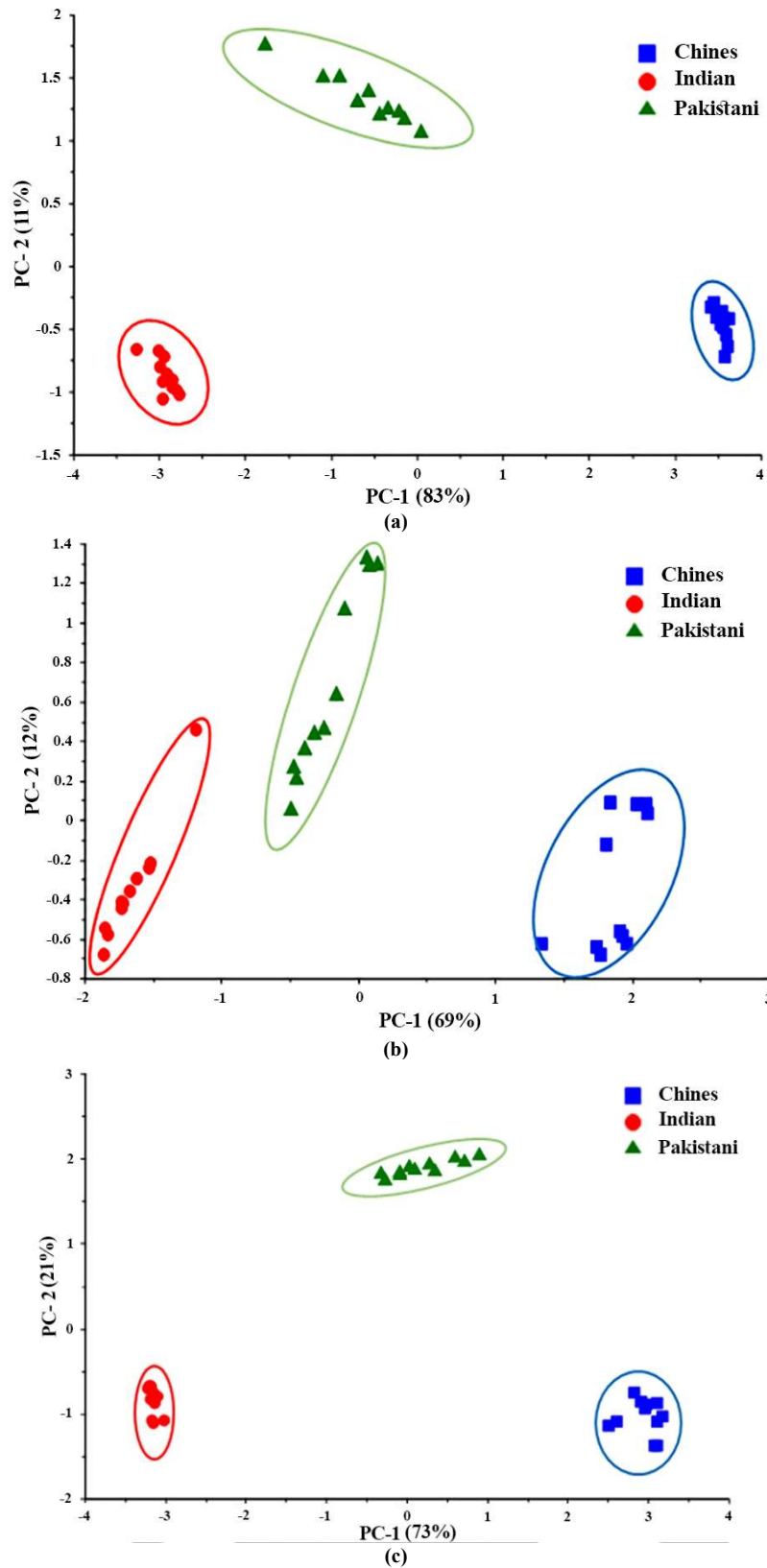
هم‌چنین به‌منظور طبقه‌بندی داده‌ها از دو نوع ماشین بردار پشتیبان C-SVM و Nu-SVM با تابع کرنل خطی استفاده شد و پارامترهای C و Nu از طریق به حداقل رساندن خطای اعتبارسنجی و به‌صورت پارتیشن‌بندی شبکه‌ای به‌دست آمدند. نتایج نشان داد که این روش قابلیت بالایی در تفکیک نمونه‌ها



شکل (۲) میانگین پاسخ حسگرهای MOS مدوله شده با الگوی ولتاژ سینوسی. (a) فلفل سیاه، (b) دارچین، (c) زردچوبه

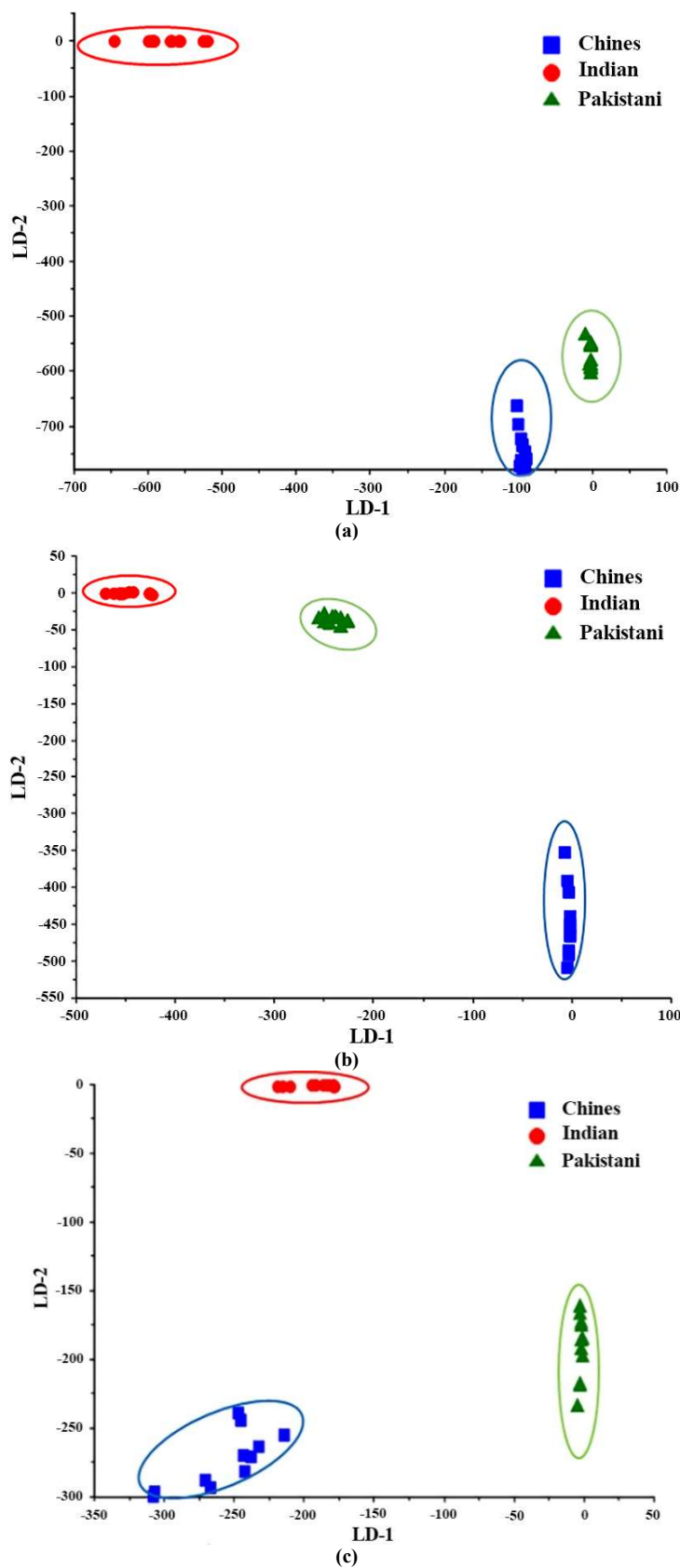
(خطوط خط چین عمودی جداکننده پاسخ حسگرهای MOS مختلف در زمان اندازه‌گیری می‌باشند)

Fig. 2. Mean MOS responses for sinusoid voltage pattern. a) Black pepper, b) Cinnamon, c) Turmeric (The vertical line separate responses of different MOS sensors during measuring time)



شکل (۳) نمودار اسکور تحلیل PCA بر اساس منشاء جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی برای سه ادویه. (a) فلفل سیاه، (b) دارچین، (c) زردچوبه  
Fig. 3. PCA score plot for three spices based on Chinese, Indian and Pakistani geographic origin. a) Black pepper, b) Cinnamon, c) Turmeric





شکل (۴) نمودار اسکور تحلیل LDA بر اساس منشأ جغرافیایی چین، هند و پاکستان برای سه ادویه. (a) فلفل سیاه، (b) دارچین، (c) زردچوبه  
 Fig. 4. LDA score plot for three spices based on Chinese, Indian and Pakistani geographic origin. a) Black pepper, b) Cinnamon, c) Turmeric

جدول (۲) ماتریس اغتشاش به دست آمده از SVM برای فلفل سیاه.

Table 2 The SVM confusion matrix for Black pepper.

پاکستان Pakistan	هند India	چین China	مشاهده/پیش‌بینی Predicted / Real
0	0	11	چین China
0	11	0	هند India
11	0	0	پاکستان Pakistan

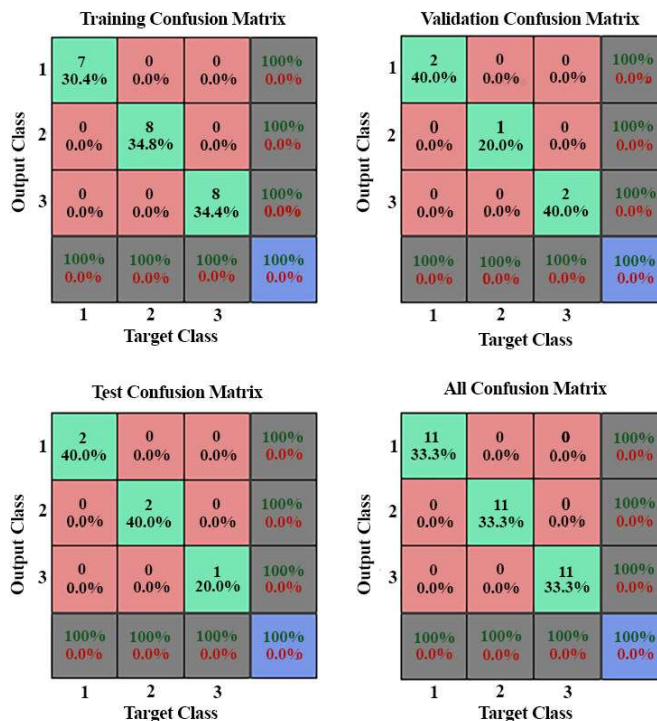
دقت طبقه‌بندی ۱۰۰٪.

Classification accuracy 100%

جدول (۳) عملکرد و پارامترهای به دست آمده توسط ماشین بردار پشتیبان.

Table 3 Performance and parameters obtained by support vector machine.

نوع ادویه Spice	پارامترهای بهینه Optimal Parameters		دقت مدل Accuracy	
	c-SVM	Nu-SVM	c-SVM	Nu-SVM
فلفل سیاه Black pepper	0.028	0.1	100	100
دارچین Cinnamon	0.077	0.119	100	100
زردچوبه Turmeric	0.037	0.206	100	100



شکل (۵) ماتریس اغتشاش به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی در طبقه‌بندی نمونه‌های زردچوبه در مراحل آموزش، آزمون و ارزیابی، اعداد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر کلاس‌های مربوط به نمونه‌ها با منشأ جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی

Fig. 5. Confusion matrix obtained from artificial neural network in the classification of turmeric samples in training, testing and validation.

numbers 1, 2, and 3, represent classes of samples with geographic origin of Chinese, Indian, and Pakistani, respectively

#### ۴. نتیجه‌گیری

باتوجه به استفاده گسترده از ادویه‌جات و گیاهان معطر در صنایع غذایی، به‌کارگیری ابزارهای نوین، سریع و دقیق به‌منظور طبقه‌بندی سریع ارقام مختلف ادویه بر اساس منشاء جغرافیایی با هدف ارزیابی کیفیت و اصالت محصولات برای مقابله با تقلبات غذایی و حمایت از حقوق مصرف‌کنندگان ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش قابلیت بینی الکترونیک با هشت حسگر MOS تحت اثر مدولاسیون دمایی برای طبقه‌بندی سه نوع ادویه (لفل سیاه، دارچین و زردچوبه) بر اساس سه منشاء جغرافیایی (هند، چین و پاکستان) مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های شناسایی و تفکیک الگوی تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل تفکیک خطی (LDA)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) انجام شد. طبقه‌بندی داده‌های حاصل از سیگنال‌های به‌دست آمده از آرایه حسگری نشان داد که هر سه روش LDA، SVM و ANN عملکرد بسیار مناسبی در تفکیک ادویه‌ها بر اساس منشاء جغرافیایی داشته و دقت ۱۰۰٪ در طبقه‌بندی به‌دست آمد. براساس نتایج به‌دست آمده، مدولاسیون دمایی حسگرهای MOS در ترکیب با روش‌های تشخیص الگو توانایی تفکیک منشاء جغرافیایی ادویه‌های فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه را دارد. چنین دستاوردی می‌تواند برای تسریع در ایجاد پروتکل‌های اندازه‌گیری در سیستم‌های بینی الکترونیک برای استفاده فراگیر در صنعت استفاده شود.

#### سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد ۱۵۳۱/۱۴۱ از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد.

دارد و با دقت ۱۰۰٪ نمونه‌ها را بر اساس منشاء جغرافیایی طبقه‌بندی نمود. به‌عنوان نمونه، ماتریس اغتشاش به‌دست آمده از این تحلیل برای نمونه‌های فلفل سیاه در جدول (۲) نشان داده شده است. پارامترهای بهینه مدل‌های به‌دست آمده برای تفکیک بر اساس منشاء جغرافیایی هر کدام از سه نوع ادویه در جدول (۳) آورده شده است. طاهری و همکاران نیز با استفاده از بینی الکترونیک و روش ماشین بردار پشتیبان، هفت نوع زعفران جمع‌آوری شده از سه کشور ایران، مراکش و سوریه را با دقت ۱۰۰٪ بر اساس منشاء جغرافیایی طبقه‌بندی کردند [۳۴].

از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه برای طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس منشاء جغرافیایی استفاده شد. بدین منظور با در نظر گرفتن تعداد حسگرها، ۷ نرون برای ورودی و ۳ نرون (با توجه به منشاء جغرافیایی) برای لایه خروجی شبکه در نظر گرفته شد. با آموزش شبکه با تعداد مختلف نرون در لایه مخفی، برای هر کدام از ادویه‌ها شبکه‌ی بهینه ایجاد شد. شبکه‌های عصبی با ساختارهای ۳-۵-۷، ۳-۷-۷ و ۳-۴-۷ به‌ترتیب برای فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه بالاترین دقت در طبقه‌بندی را داشتند. در آموزش شبکه از تابع انتقال تانژانت سیگموئید در لایه مخفی و الگوریتم یادگیری لوبنبرگ-مارکواریت استفاده شد. نرخ صحیح طبقه‌بندی برای سه شبکه مذکور ۱۰۰٪ به‌دست آمد. ماتریس اغتشاش به‌دست آمده برای نمونه‌های زردچوبه در شکل (۵) نشان داده شده است.

#### ۴.۳. صحت سنجی مدل‌های طبقه‌بندی

به منظور اطمینان از صحت مدل‌های طبقه‌بندی به‌دست آمده از تحلیل‌های LDA، SVM و ANN از ۳۰٪ داده‌ها که قبلاً در فرایند ایجاد مدل به‌کار نرفته‌اند، در صحت سنجی مدل‌ها استفاده شد. اگرچه ارزیابی شبکه‌های عصبی در حین ساخت مدل انجام می‌شود، برای بررسی بیشتر، صحت‌سنجی مدل بهینه در این قسمت نیز تکرار شد. نتایج به‌دست آمده برای هر سه مدل LDA، SVM و ANN بیانگر دقت ۱۰۰٪ آن‌ها در طبقه‌بندی داده‌ها می‌باشد.

#### منابع

[2] Banach, U., Tiebe, C., Hübert, T. (2012). Multigas sensors for the quality control of spice mixtures. *Food Control.*, 26, 23-27.

[1] Peter, K. V. (2012). *Handbook of Herbs and Spices*, 2nd ed., Woodhead Publishing: Cambridge, U.K, pp 215-248.



- [17] Smulko J. M., Trawka M., Granqvist C.G., Ionescu R., Annanouch F., Lobet E. and Kish L.B. (2015). New approaches for improving selectivity and sensitivity of resistive gas sensors: a review. *Sensor Review*, 35, 340-347.
- [18] Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S.S., Siadat, M., Ahmadi, H., Razavi, S.H. (2015). From simple classification methods to machine learning for the binary discrimination of beers using electronic nose data. *Eng. Agric. Environ. Food.*, 8, 44-51.
- [19] Tohidi, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghafarinia, V., Bonyadian, M., Mohtasebi, S. (2018). Development of a metal oxide semiconductor-based artificial nose as a fast, reliable and non-expensive analytical technique for aroma profiling of milk adulteration. *Int. Dairy J.*, 77, 38-46.
- [۲۰] توحیدی، م.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ غفاری نیا، و.؛ محتسبی، س.س.؛ بنیادیان، م.؛ (۱۳۹۵). ساخت و توسعه یک سامانه ماشین بویایی در ترکیب با روش‌های شناسایی الگو برای تشخیص تقلب فرمالین در شیر خام. مهندسی بیوسیستم/ایران، جلد ۴۷، شماره ۴، ص ۱۰-۱۰.
- [21] Azid, S.I., Kumar, S. (2011). Analysis and Performance of a Low Cost SMS Based Home Security System. *Int. J. Smart Home*, 5, 15-24.
- [22] Ghasemi-Varnamkhasti, M., Safari Amiri, Z., Tohidi, M., Dowlati, M., Mohtasebi, S.C., Silva, A.D.S., Fernandes, D., Araujo, M. (2018). Differentiation of cumin seeds using a metal-oxide based gas sensor array in tandem with chemometric tools. *Talanta*, 176, 221-226.
- [23] Tohidi, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghafarinia, V., Bonyadian, M., Mohtasebi, S. (2018). Identification of trace amounts of detergent powder in raw milk using a customized low-cost artificial olfactory system: A novel method. *Measurement*, 124, 120-129.
- [24] Aleixandre, M.J., Lozano, J., Gutiérrez, I., Sayago, M.J., Fernández Horrillo, M.C. (2008). Portable e-nose to classify different kinds of wine. *Sens. Actuators, B.*, 131 (1), 71-76.
- [25] Yu, H., Wang, J., Xiao, H., Liu, M. (2009). Quality grade identification of green tea using the eigenvalues of PCA based on the E-nose signals. *Sens. Actuators, B.*, 378-382.
- [26] Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S.S., Siadat, M., Lozano, J., Ahmadi, H., Razavi, S.H. Dicko, A. (2012). Discriminatory power assessment of the sensor array of an electronic nose system for the detection of non alcoholic beer aging. *Czech J Food Sci*, 30, 236-240.
- [۲۷] صفری امیری، ز.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ توحیدی، م.؛ محتسبی، س.س.؛ دولتی، م. (۱۳۹۶). استفاده از سامانه ماشین
- [3] Ghasemi-Varnamkhasti M., Tohidi M., Mishra P., Izadi Z. (2018). Temperature modulation of electronic nose combined with multi-class support vector machine classification for identifying export caraway cultivars. *Postharvest Biol Tec.*, 138, 134-139.
- [4] Liu, H., Zeng, F., Wang, Q., shiyi, O., Gu, F. (2013). The effect of cryogenic grinding and hammer milling on the flavour quality of ground pepper (*Piper nigrum* L.). *Food Chem.*, 141, 3402-3408.
- [5] Colak, H., Baris, E., Hampikyan, H., Nazli, B. (2006). Determination of Aflatoxin Contamination in Red-Scaled, Red and Black Pepper by ELISA and HPLC. *J Food Drug Anal.*, 14, 292-296.
- [6] Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S.S., Siadat, M., Ahmadi, H., Razavi, S.H. (2015). From simple classification methods to machine learning for the binary discrimination of beers using electronic nose data. *Eng. Agric. Environ. Food.*, 8, 44-51
- [7] Figen, F., Balaban, M. (2008). *Electronic nose technology in food analysis: In Handbook of food analysis instruments*, 1<sup>st</sup> ed, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp 365-378.
- [8] Peris, M., Escuder-Gilabert, L. (2009). A 21st century technique for food control: electronic noses. *Analytica Chimica Acta.*, 638, 1-15.
- [9] Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S.S., Rodriguez-Mendez, M.L., Lozano, J., Razavi, S.H., Ahmadi, H. (2011b). Potential application of electronic nose technology in brewery. *Trends Food Sci. Technol.*, 22, 165-174.
- [10] Zhang, H., Balaban, M., Principe, J. C., Portier, K. (2005). Quantification of spice mixture compositions by electronic nose. *J. Food Sci.*, 70, 253-258.
- [11] Loutfi, A., Coradeschi, S., Mani, G.K., Shankar, P. Rayappan, J.B. (2015). Electronic noses for food quality: a review. *J. Food Eng.*, 144, 103-111.
- [12] Monroy, J.G., González-Jirón, J., Blanco, J.L. (2012). Overcoming the slow recovery of MOX gas sensors through a system modeling approach. *ACS Sens.*, 12, 13664-13680.
- [13] Herrero-Carrón, F., Yáñez, D.J., Rodríguez, F. (2015). An active, inverse temperature modulation strategy for single sensor odorant classification. *Sens. Actuators, B.*, 555-563.
- [14] Nakata S. and Okunishi H. (2005). Characteristic responses of a semiconductor gas sensor depending on the frequency of a periodic temperature change. *Appl. Surf. Sci.*, 240: 366-374.
- [15] Ngo, K.A., Lauque, P., Aguir, K. (2007). High performance of a gas identification system using sensor array and temperature modulation. *Sens. Actuators, B.*, 209-216.
- [16] Hossein-Babaei F. and Amini A. (2014). Recognition of complex odors with a single generic tin oxide gas sensor. *Sens. Actuators, B.*, 194:156-163

بویایی به منظور تشخیص تقلب در زیره کوهی. علوم و فناوری‌های

نوین غذایی، جلد ۵، شماره ۳، ص ۵۲۷-۵۴۱.

[28] Amari, A. El., Bari, N., Bouchikhi, B. (2007). Electronic nose for anchovy freshness monitoring based on sensor array and pattern recognition methods: principal components analysis, linear discriminant analysis and support vector machine. *Int J Found Cpmput S.*, 6, 61-67.

[29] Balasubramanian, S., Panigrahi, S., Logue, C.M., Marchello, M. (2009). Neural networks-integrated metal oxide-based artificial olfactory system for meat spoilage identification. *J. Food Eng.*, 91, 91-98.

[30] Omid, M., Mahmoudi, A. Omid, M. H. (2009). An intelligent system for sorting pistachio nut varieties. *Expert Syst. Appl.*, 36, 11528-11535.

[31] Oliveros, C.C., Pavon, J.L.P., Pinto, C.G., Laespada, E.F., Cordero, B.M., Forina, M. (2002). Electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors as a fast alternative for the detection of adulteration of virgin olive oils. *Anal. Chim. Acta.*, 459, 219-228.

[32] Carmona, M., Martinez, J., Zalacain, A., Rodriguez-Mendez, M.L., de Saja, J.A., Alonso, G.L. (2006). Analysis of saffron volatile fraction by TD-GC-MS and e-nose. *Eur. Food Res. Technol.*, 223, 96-101.

[33] Baby, R.E., Sance, M.M., Bauzá, M., Messina, V.M., Gómez, A.R., Burba, j.L. (2009). Electronic nose study of powdered garlic. *Sens. Trans. J.*, 107, 26-34.

[34] Tahri, K., Tiebe, C., Bougrini, M., Saidi, T., El Alami-El Hassani, N., El Bari, N., Hübert, T., Bouchikhi, B. (2015). Characterization and discrimination of saffron by multisensory systems, SPME-GC-MS and UV-vis spectrophotometry. *Anal. Methods.*, 7, 10328-10338.