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

**مجتبی توحیدی1، مهدی قاسمی­ورنامخواستی\*2، مهدی قاسمی­نافچی3، مجتبی نادری بلداجی4، فاثزه جمالیزاده 5 ، سید محمد صفی الدین اردبیلی 6 مهدی خانی 7**

1. دانش­آموخته دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی شهرکرد

2. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

3. استادیار، گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

 4. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

5. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

6. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

7 استادیار، گروه مهندسی مکانیزاسیون، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

 \*نویسنده مسئول: ghasemymahdi@ut.ac.ir

**چکیده**

ادویه علاوه­بر تاثیر در طعم و کیفیت مواد غذایی، به دلیل خواص ضد میکروبی یا آنتی اکسیدانی عمر ماندگاری مواد غذایی را نیز فزایش می­دهد.گونه­های مختلف ادویه­ها بر اساس محل رویش، کیفیت و ارزش اقتصادی متفاوتی دارند. بنابراین طبقه­بندی و جداسازی آن­ها براساس منشاء جغرافیایی مورد توجه مصرف­کنندگان و فروشندگان بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش توانایی کاربرد بینی الکترونیک بر پایه حسگرهاي نیمه­هادي اکسید فلزي به عنوان ابزاري غیرمخرب براي تشخیص منشاء جغرافیایی (هند، چین و پاکستان) سه ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه مورد مطالعه قرار گرفت. مدولاسیون دمایی به صورت الگوی ولتاژ سینوسی انجام شد و پاسخ گذرای حسگرها برای تحلیل داده­ها مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل مولفه­هاي اصلی(PCA) ، تحلیل تفکیک خطی(LDA)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه­های عصبی مصنوعی (ANN) روش­هایى بودند که براي رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تصویر داده­ها با استفاده از روش PCA به صورت کاملا واضح خوشه­های مجزایی را بر روی فضای تغییر شکل یافته PC ایجاد کرد. با کاربرد روش­های LDA، SVM و ANN در تفکیک بر اساس منشاء جغرافیایی برای هر سه ادویه، دقت طبقه­بندی %100 بدست آمد. همچنین از صحت­سنجی مدل­های مذکور دقت %100 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 منشاء جغرافیایی باشد.

**واژه‌های کلیدی: بینی الکترونیک، ‌مدولاسیون دمایی، ادویه**

**1- مقدمه**

ادويه­ها به عنوان بخشی از گياهان معطر كه به صورت كامل يا شكسته و خرد­شده استفاده می­شوند و نقش قابل توجهي در تغذيه روزانه دارند. امروزه ادویه­ها به عنوان یکی از متداول­ترین طعم­دهنده­ها با منشاء طبیعی در تهیه و فرآوري مواد غذایی کاربرد فراوان دارند و نقش حیاتی در زندگی روزمره انسان­ها دارند و از خواص تغذیه­ای، آنتی اکسیدانی، ضد میکروبی و دارویی آنها در زمینه­های مختلف استفاده می­شود. هچنین 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 [1].

تغییرات کیفیت و ترکیب ادویه­ها حتی در مقادیر کم، موجب تاثیر ناخواسته­ای بر مواد غذایی می­شود. بنابراین کنترل کیفیت به منظور حفظ رضایت و حقوق مصرف کنندگان 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 [2]. 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 می گذارد، از این ویژگی می­توان برای شناسایی ارقام مختلف ادویه بر اساس منشاء جغرافیایی استفاده کرد [3]. ادویه­ها درکشور­های مختلفی از جمله کشورهای هندوستان، پاکستان، چین و کشورهای آسیا­­ی شرقی و جنوبی به صورت بومی خودرو و کشت شده تولید می­شوند. این ادویه­ها با توجه به منطقه­ی جغرافیایی دارای درجه­ی کیفیت­های متفاوتی هستند. به عنوان 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 الکترونیکی احساس می­شود و بررسی منابع نیز با تاکید بر کاربرد این روش نگارش شده است.

روش تست پنل[[1]](#footnote-1) 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 [4]. روش­های آزمایشگاهی مانند کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا (HPLC) با آنکه نوع و میزان ترکیبات آلی فرار نمونه­ها را مشخص می­کند و دارای دقت بالایی است ولی بسیار پر هزینه است [5].

بینی الکترونیک یکي از روش­هاي نوين در سنجش كیفیت مواد­غذايي است که به وسیله يک آرايه از حسگرهاي غیر اختصاصي، سعي در تشخیص و تفکیک بوهای پیچیده متصاعد شده از نمونه­ها دارد [6] و پژوهشگران زیادی استفاده از این روش در صنایع غذایی را پیشنهاد کرده­اند [10-7]. در بینی الکترونیک از حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای پلیمری آلی هادی (CP[[2]](#footnote-2))، کریستال­های پیزوالکتریک (BAW[[3]](#footnote-3) و SAW[[4]](#footnote-4))، نیمه ­هادی­های اکسید فلزی (MOS[[5]](#footnote-5)) و نیمه هادی­های اکسید فلز ترانزیستور اثر میدان (MOSFET[[6]](#footnote-6)) 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 [11]. توان مصرفی بالا، انتخاب­گری پایین، زمان بازیابی آهسته و زمان پاسخ طولانی از چالش­های موجود در استفاده از این نوع حسگرها می­باشند [12]. زمان بازیابی آهسته حسگر یک محدودیت برای آن در تشخیص سریع گازها می­باشد. مدولاسیون دمایی[[7]](#footnote-7) یک راهکار برای حل این مشکل است [13]. 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 ولتاژی متفاوت به ریزگرمکن آن، تغییر داده می­شود. تغییر دمای سطح حساس نیز منجر به تغییر خواص فیزیکو- شیمیایی آن می‌گردد [14]. به عنوان مثال افزایش حساسیت و انتخاب­گری حسگرها پس از استفاده از مدولاسیون دمایی ازجمله یافته­هایی است که توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [13، 17-15]. همچنین استفاده از پاسخ گذرای[[8]](#footnote-8) حسگرها به جای پاسخ حالت پایدار[[9]](#footnote-9) آن با کاهش زمان اندازه­گیری، منجر به کاهش توان مصرفی حسگرها می­شود [18].

با توجه به جستجو‌های بعمل 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 سامانه­ی 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.

**2- مواد و روش‌ها**

**2-1- 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.

**2-2- بینی الکترونیکی**

در این پژوهش به‌منظور تشخیص تشخیص منشاء جغرافیایی ادویه­جات، از بینی الکترونیک ساخته شده در دانشگاه شهرکرد استفاده شد [19]. این سامانه از قسمت­های محفظه نمونه­گیری، آرایه حسگری، شیرهای قطع و وصل، پمپ، سامانه تحصیل 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 هرکدام از آن­ها به 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 [20]. در جدول (1) به مشخصات حسگرهای مورد استفاده در این سامانه اشاره شده است. همچنین به منظور پایش همزمان دما و رطوبت نسبی محفظه حسگری، از حسگر (Sensirion, Swiss) SHT75 استفاده شد. این حسگر یک تراشه دما و رطوبت کاملا کالیبره شده با کیفیت بالا، خروجی دیجیتال و توان مصرف پایین می­باشد [21].

**جدول (1) نام، مشخصات و محدوده تشخیص حسگرهای مورد‌ استفاده در بینی الکترونیکی**

همانطور که در پژوهش­های قبلی نیز گزارش شده است [22]،‌ 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 است و بوی متصاعد شده از نمونه در فضای فوقانی محفظه نمونه توسط پمپ با دبی 3/1 لیتر بر دقیقه از طریق این مجرا به محفظه حسگرها منتقل می­شود. همچنین به منظور اطمینان از عملکرد صحیح حسگرها، 30 دقیقه قبل از شروع آزمایش­ها، مجموعه حسگرها توسط یک بورد واسط شروع به کار کرده تا به پایداری دمایی برسد [23]. در پژوهش­های پیشین ولتاژ ثابت 5 ولت به ریزگرمکن حسگرها اعمال شده و پس از تزریق بو به محفظه حسگری، از پاسخ حالت پایدار حسگرها به منظور تحلیل نتایج استفاده می­شد [19، 23-22]، اما در این پژوهش و برای مدولاسیون دمایی، الگوی ولتاژی به صورت تابع سینوسی با دامنه 0-5 ولت و فرکانس 025/0 هرتز به ریزگرمکن حسگرها اعمال شد (شکل 1). سپس پاسخ حسگرها به عنوان پاسخ گذرا به وسیله یک سامانه تحصیل داده (National Instruments Corporation, USA) NI USB-6009 برنامه­ ریزی شده با نرم افزار LabView2013 جمع آوری و ذخیره شد.

**شکل (1) الگوی ولتاژی اعمال شده به ریزگرمکن حسگرها آرایه حسگری تحت مدولاسیون دمایی**

**2-3 راهبرد تحلیل داده**

**2-3-1 پیش پردازش داده­ها**

داده­های بینی الکترونیک متشکل از سری­های زمانی پاسخ حسگرها تحت مدولاسیون دمایی در مدت زمان 40 ثانیه 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 حسگر صرف­نظر شد. با توجه به نرخ نمونه­برداری 5 داده در ثانیه، در مدت زمان 40 ثانیه تعداد 201 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 × 201 = 1407 بود. همچنین برای هر منشاء جغرافیایی تعداد 16 تکرار در آزمایش انجام شد. بنابراین برای سه منشاء جغرافیایی (چین، هند و پاکستان) تعداد
 3 × 16 = 48 داده ثبت گردید. نهایتا برای هر یک از سه ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه یک مجموعه داده با تعداد
 48 × 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 پیش خطا در مدلسازی، داده­ها با استفاده از ﺗﺒﺪﻳﻞ ﻣﺘﻐﻴﺮ ﻧﺮﻣﺎل اﺳﺘﺎﻧﺪارد(SNV[[10]](#footnote-10)) نرمال­سازی شدند. SNV یک روش نرمال­سازی داده­ است که با تبدیل داده­ها به میانگین صفر[[11]](#footnote-11) و انحراف استاندارد واحد، داده­ها را نرمال می­کند و از رابطه (1) محاسبه می­شود [20].

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

که در آن X بردار داده­های اولیه، mean (X) میانگین X، std (X) انحراف معیار X و Z متغیر نرمال شده می­باشد. لازم به ذکر است که قبل از انجام تحلیل­ها %30 از داده­ها جداسازی شد و تحلیل­ها با %70 داده­های باقیمانده از مجموعه داده انجام شد. در انتها برای صحت­سنجی مدل­های ایجاد شده از این مجموعه داده %30 استفاده شد.

 **2-3-2 تحلیل مولفه­های اصلی (PCA[[12]](#footnote-12))**

PCA یک روش آماری چند متغيره است که از آن برای کاهش ابعاد داده­ها، استخراج ویژگی­ها و همچنین تشخیص الگو استفاده می­شود و به طور گسترده در تحلیل داده­های بینی الکترونیک استفاده شده است [26-24]. 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 متغیرهاي مسئله، مولفه اصلی مسـتقل اسـتخراج نمود ولی معمولاً از چند مولفه اصـلی اول که درصد قابل قبولی از واریانس بین داده­ها را توجیه می­کنند استفاده می­شود[18].

**2-3-3 تحلیل تفکیک خطی (LDA[[13]](#footnote-13))**

تحلیل تفکیک خطی یک روش متداول آماری تحت نظارت است که معمولا برای پیدا کردن ترکیب خطی خصوصیاتی 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 $m=min⁡(K-1,N)$ 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 درون‌گروهی کمینه می­شود [20].

**2-3-4 ماشین بردار پشتیبان (SVM[[14]](#footnote-14))**

SVM یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که اولین بار در سال 1995 توسط کورتس و وپنیک برای حل مسائل دو کلاسه ارائه شد و اکنون در زمینه‌های طبقه‌بندی، خوشه‌بندی و مدل‌سازی (رگرسیون) مورد‌استفاده قرار می‌گیرد [27]. اگر داده­ها به صورت خطی قابل جداسازی باشند از ماشین­های خطی برای تولید یک سطح بهینه که داده­ها را بدون خطا و با حداکثر فاصله­ی میان صفحه و نزدیک­ترین نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک می­نماید، استفاده می­شود. در غیر اینصورت با استفاده از توابع کرنل مختلف مانند کرنل خطی، چند جمله­ای، تابع پایه شعاعی و تابع سیگموئید، می­توان از این روش در طبقه­بندی غیر­خطی داده­ها نیز استفاده نمود [28].

**2-3-5 شبکه­های عصبی مصنوعی (ANN[[15]](#footnote-15))**

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 [29]. در دهه اخیر استفاده از این روش داده­کاوی در زمینه­های گوناگونی از قبیل طبقه­بندی محصولات کشاورزی گسترش یافته است [30]. شبکه عصبی به عنوان یکی از روش­های کمومتریکس از پتانسیل بالایی برای تحلیل سیگنال­های حسگرهای بینی الکترونیکی برخوردار هستند [31]. 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 لونبرگ-مارکوارت[[16]](#footnote-16) استفاده شد. داده­ها به سه قسمت آموزش، آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب با نسبت 70، 15 و 15 درصد 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 (2) استفاده شد.

$$CCR\left(\%\right)=\frac{N\_{right}}{N}×100 (2)$$

که Nright تعداد نمونه­هایی است که به طور 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 به صورت تصادفی و از کل محدوده داده­ها صورت پذیرفت.

**3- نتایج و بحث**

**3-1- پاسخ حسگرها**

در شکل (2) میانگین پاسخ­ حسگرها برای نمونه­های فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه (با سه منشاء جغرافیایی چین، هند و پاکستان) در هنگام اعمال الگوی ولتاژ سینوسی در مدت زمان 40 ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می­شود، پاسخ حسگرها نسبت به نمونه­ها با منشاء جغرافیایی متفاوت، الگوی تقریبا 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 منشاء جغرافیایی با یکدیگر متمایز می­باشند (شکل 2- الف). برای نمونه­های دارچین، همپوشانی الگوی بدست آمده از پاسخ حسگرها بیشتر از حالت قبل می­باشد اگرچه به ترتیب در بازه انتهایی و ابتدایی پاسخ حسگرهای MQ4 و TGS813، تمایز پاسخ­ها مخصوصا برای منشاء جغرافیایی چین از هند و پاکستان دیده می­شود (شکل 2- ب). این تمایز در پاسخ حسگرها برای نمونه­های زردچوبه بیشتر است بگونه­ای که میانگین پاسخ حسگرهای MQ3 و MQ4 در کل زمان اندازه­گیری برای هر سه نوع زردچوبه هندی، چینی و پاکستانی کاملا از هم متمایز می­باشند (شکل 2- ج). در ادامه به منظور بررسی دقیق­تر تفاوت­های موجود در داده­ها، از روش تحلیل مولفه­های اصلی استفاده شد.

**شکل (2) میانگین پاسخ حسگرهای MOS مدوله شده با الگوی ولتاژ سینوسی. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه. (خطوط خط­چین عمودی جدا­کننده پاسخ حسگرهای MOS مختلف در زمان اندازه­گیری می­باشند)**

**3-2- تحلیل مولفه اصلی**

به‌منظور تشخیص منشاء جغرافیایی در نمونه‌های سه نوع ادویه فلفل سیاه، دارچین و زردچوبه با استفاده از داده‌های بدست 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 (3) نمودارهای اسکور بدست 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 منشاء جغرافیایی است. نتایج این تحلیل برای نمونه­های فلفل سیاه و زردچوبه در شکل­های (3- الف) و (3- ب) آورده شده است. همانطور که مشاهده می­شود نمونه­های چینی، هندی و پاکستانی فلفل سیاه و زردچوبه به طور کامل از یکدیگر مجزا شدند و دو مؤلفه اصلی اول 94% واریانس مجموعه داده‌ها (%11, PC2= %83PC1=) را در تفکیک سه منشاء جغرافیایی توصیف کرده­اند. همچنین برای نمونه­های دارچین دو مولفه­ی اصلی PC1 و PC2 به ترتیب 69 و 12% واریانس بین نمونه­ها و در مجموع %81 درصد واریانس کل را توصیف کردند. همان­طور که مشاهده می­شود تمایز مناسبی بین نمونه­ی هندی با دو نمونه­ی دیگر و تفکیک­پذیری بالایی بین هر سه نمونه وجود دارد (شکل 3- ب). Carmona et al. (2006) با استفاده از بینی الکترونیک تفکیک­پذیری یازده نمونه مختلف زعفران گردآوری شده از چهار کشور ایران،‌ اسپانیا، مراکش و یونان را بر اساس منشاء جغرافیایی بررسی کردند. نتایج آنها با تحلیل PCA تفکیک بسیار خوب نمونه­های زعفران بر اساس چهار منشاء جغرافیایی را نشان داد [32].

**شکل (3) نمودار اسکور تحلیل PCA بر اساس منشاء جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی برای سه ادویه. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه**

**3-3- 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 (4) نتایج حاصل از روش LDA با استفاده از اعتبارسنجی متقابل با یک نمونه خارج شده[[17]](#footnote-17) 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 100% این نمونه­ها را بر اساس سه منشاء جغرافیایی چین، هند و پاکستان طبقه­بندی نموده است. Baby et al. (2009) نمونه­های مختلف سیر جمع آوری شده از هشت منشاء جغرافیایی متفاوت را با استفاده از بینی الکترونیک و روش تفکیک الگوی LDA با دقت بالا پیش­بینی و طبقه­بندی نمودند [33].

**شکل (4) نمودار اسکور تحلیل LDA بر اساس منشاء جغرافیایی چین، هند و پاکستان برای سه ادویه. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه**

همچنین به­منظور طبقه­بندی داده­ها از دو نوع ماشین بردار پشتیبان C-SVM و Nu-SVM با تابع کرنل خطی استفاده شد و پارامترهایC وNu از طریق به حداقل رساندن خطای اعتبارسنجی و به صورت پارتیشن­بندی شبکه­ای[[18]](#footnote-18) بدست آمدند. نتایج نشان داد که این روش قابلیت بالایی در تفکیک نمونه­ها دارد و با دقت 100% نمونه­ها را بر اساس منشاء جغرافیایی طبقه­بندی نمود. به عنوان نمونه، ماتریس اغتشاش بدست آمده از این تحلیل برای نمونه­های فلفل سیاه در جدول (2) نشان داده شده است. پارامترهای بهینه مدل­های بدست آمده برای تفکیک بر اساس منشاء جغرافیایی هر کدام از سه نوع ادویه در جدول (3) آورده شده است. Tahri et al. (2015) 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 100% بر اساس منشاء جغرافیایی طبقه­بندی کردند [34].

**جدول (2) ماتریس اغتشاش بدست آمده از SVM برای فلفل سیاه**

**جدول (3) عملکرد و پارامترهای بدست آمده توسط ماشین بردار پشتیبان**

از شبکه­ی عصبی پرسپترون چند لایه برای طبقه­بندی نمونه­ها بر اساس منشاء جغرافیایی استفاده شد. بدین منظور با در نظر گرفتن تعداد حسگرها، 7 نرون برای ورودی و 3 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 3-5-7، 3-7-7 و 3-4-7 به ترتیب 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 لونبرگ- مارکوارت استفاده شد. نرخ صحیح طبقه­بندی برای سه شبکه مذکور 100% بدست آمد. ماتریس اغتشاش بدست آمده برای نمونه­های زردچوبه در جدول (4) نشان داده شده است.

**3-4 صحت سنجی مدل­های طبقه­بندی**

به منظور اطمینان از صحت مدل­های طبقه­بندی بدست آمده از تحلیل­های LDA، SVM و ANN از 30 درصد داده­ها که قبلا در فرآیند ایجاد مدل بکار 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 بدست آمده برای هر سه مدل LDA، SVM و ANN بیانگر دقت 100% آنها در طبقه­بندی داده­ها می­باشد.

**جدول (4) ماتریس اغتشاش بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی در طبقه­بندی نمونه­های زردچوبه در مراحل آموزش، آزمون و ارزیابی، اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب بیانگر کلاس­های مربوط به نمونه­ها با منشاء جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی.**

**4- 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 (فلفل 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 به دست 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 100 درصد در طبقه­بندی بدست آمد. براساس نتایج به­دست آمده، مدولاسیون دمایی حسگرهاي MOS در ترکیب با روش­هاي 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**

اين مقاله مستخرج از نتايج طرح تحقيقاتي اجرا شده به شماره قرارداد 141/1531 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوري دانشگاه شهرکرد مي‌باشد.

**منابع**

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

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

[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 Biology and Technology*, 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 Chemistry*, 141 (4), 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. *Journal of Food and Drug Analysis*, 14(3), 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. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8, 44-51

[7] Figen, F., Balaban, M. (2008). Electronic nose technology in food analysis. In Handbook of food analysis instruments, *Taylor & Francis*.

[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 in Food Science and Technology*, 22(4), 165–174.

[10] Zhang, H., Balaban, M., Principe, J. C., Portier, K. (2005). Quantification of spice mixture compositions by electronic nose. *Journal of Food Science*, 70, 253-258.

[11] Loutfi, A., Coradeschi, S., Mani, G.K., Shankar, P. Rayappan, J.B. (2015). Electronic noses for food quality: a review. Journal of Food Engineering, 144, 103–111

[12] Monroy, J.G., Gonźalez-Jiḿenez, J., Blanco, J.L. (2012). Overcoming the slow recovery of MOX gas sensors through a system modeling approach. *Sensors,* 12, 13664–13680.

[13] Herrero-Carrón, F., Yánez, D.J., Rodríguez, F. (2015). An active, inverse temperature modulation strategy for single sensor odorant classification. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 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. *Applied surface science,* 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. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 209–216.

[16] Hossein-Babaei F. and Amini A. (2014). Recognition of complex odors with a single generic tin oxide gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical,* 194:156-163

[17] Smulko J. M., Trawka M., Granqvist C.G., Ionescu R., Annanouch F., Llobet E. and Kish L.B. (2015). New approaches for improving selectivity and sensitivity of resistive gas sensors: a review. *Sensor Review*, 35(4), 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. *Engineering in Agriculture, Environment and 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. *International Dairy* Journal. 77, 38–46.

]20[ توحیدی، م.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ غفاری نیا، و.؛ محتسبی، س.س.؛ بنیادیان، م.؛ (1395). ساخت و توسعه یک سامانه ماشین بویایی در ترکیب با روش‌های شناسایی الگو برای تشخیص تقلب فرمالین در شیر خام. مهندسی بیوسیستم ایران. دوره 47، شماره 4، ص 1-10.

[21] Azid, S.I., Kumar, S. (2011). Analysis and Performance of a Low Cost SMS Based Home Security System. *International Journal of Smart Home*, 5(3), 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. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 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. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 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 ose system for the detection of non alcoholic beer aging. *Czech Journal of Food Sciences*, 30(3), 236–240.

]27[ صفری امیری، ز.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ توحیدی، م.؛ محتسبی، س.س.؛ دولتی، م. (1396). استفاده از سامانه ماشین بویایی به­منظور تشخیص تقلب در زیره کوهی. مجله فناوری­های نوین غذایی.

[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. *International Journal of Foundations of Computer Science,* 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. *Journal of Food Engineering*, 91, 91–98.

[30] Omid, M., Mahmoudi, A. Omid, M. H. (2009). An intelligent system for sorting pistachio nut varieties. *Expert Systems with Applications*, 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. *Analytica Chimica 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. *European* *Food Research* and *Technology*, 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. Sensors & Transducers Journal, 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. *Analytical Methods,* 7, 10328–10338.



**شکل (1) الگوی ولتاژی اعمال شده به ریزگرمکن حسگرها تحت مدولاسیون دمایی**

**Figure (1) The voltage pattern applied to micro-heater of the sensors under
temperature modulation.**

|  |
| --- |
| **الف** |
| **ب** |
| **ج** |

**شکل (2) میانگین پاسخ حسگرهای MOS مدوله شده با الگوی ولتاژ سینوسی. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه. (خطوط خط­چین عمودی جدا­کننده پاسخ حسگرهای MOS مختلف در زمان اندازه­گیری می­باشند)**

**Figure (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)**

|  |
| --- |
| **الف** |
| **ب** |
| **ج** |

**شکل (3) نمودار اسکور تحلیل PCA بر اساس منشاء جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی برای سه ادویه. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه**

**Figure (3 PCA score plot for three spices based on Chinese, Indian and Pakistani geographic origin. A) Black pepper, b) Cinnamon, c) Turmeric.**

|  |
| --- |
| **الف** |
| **ب** |
| **ج** |

**شکل (4) نمودار اسکور تحلیل LDA بر اساس منشاء جغرافیایی چین، هند و پاکستان برای سه ادویه. الف) فلفل سیاه، ب) دارچین، ج) زردچوبه**

**Figure (4) LDA score plot for three spices based on Chinese, Indian and Pakistani geographic origin. A) Black pepper, b) Cinnamon, c) Turmeric.**

**جدول (1) 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)** | **کاربردهای اصلی** | **نام حسگر** |
| **Detection range (ppm)** | **Main applications** | **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) |

**جدول (2) ماتریس اغتشاش بدست آمده از SVM برای فلفل سیاه**

**Table )2( The SVM confusion matrix for Black pepper**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| مشاهده/پیش­بینیPredicted / Real | a | b | c |
| a | 11 | 0 | 0 |
| b | 0 | 11 | 0 |
| c | 0 | 0 | 11 |
| دقت طبقه­بندی (٪) : 100Classification accuracy |
| (a) چین، (b) هند، (c) پاکستانPakistani (c), Indian (b), China (a) |

 |

**جدول (3) عملکرد و پارامترهای بدست آمده توسط ماشین بردار پشتیبان**

**Table )3(Performance and parameters obtained by support vector machine**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| نوع ادویهSpice | پارامترهای بهینهOptimal Parameters |  | دقت مدلAccuracy |
| c-SVM | Nu-SVM |  | c-SVM | Nu-SVM |
| فلفل سیاهBlack pepper | 0.028 | 0.1 |  | 100 | 100 |
| دارچینCinnamon | 0.077 | 0.119 |  | 100 | 100 |
| زردچوبهTurmeric | 0.037 | 0.206 |  | 100 | 100 |

 **جدول (4) ماتریس اغتشاش بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی در طبقه­بندی نمونه­های زردچوبه در مراحل آموزش، آزمون و ارزیابی، اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب بیانگر کلاس­های مربوط به نمونه­ها با منشاء جغرافیایی چینی، هندی و پاکستانی.**

**Table )4( 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.**



**Potential of electronic nose based on temperature-modulated metal oxide gas sensors for detection of geographical origin of spices**

**Mojtaba Tohidi 1, Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti2, Mahdi Ghasemi-Nafchi3, Mojtaba Naderi-Boldaji4, Faezeh Jamalizadeh 5, Seyed Mohammad Safieddin Ardebili6 , Mahdi Khani**

1. Ph.D., Young Researchers Club, Islamic Azad University of Shahrekord

2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

3. Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

4. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

5. MSc student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

6. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

7. Assistant Professor, Department of Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Science, University of Gilan

**Abstract**

Spices in addition to effect on the taste and quality of food, it also increases the shelf-life of foods because of its antimicrobial or antioxidant properties. Different types of spices have various quality and economic value based on their geographical origin. Therefore, classification and separation based on geographic origin are of great interest to consumers and sellers and is particular importance. In this research, the ability of an electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors as a non-destructive tool for detecting the geographical origin (India, China and Pakistan) of three spices of black pepper, cinnamon and turmeric was studied. Temperature modulation was performed as a sinusoidal voltage pattern and transient responses of sensors were analyzed for data analysis. Principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA), support vector machine (SVM) and artificial neural network (ANN) were the methods used to achieve this goal. The results showed that the data visualization using the PCA method, created a completely distinct cluster on the PC's deformed space. By using the LDA, SVM and ANN methods, the classification accuracy was 100% based on the geographical origin for all three spices. Also, verification of these models was carried out and accuracy of 100% was achieved. Therefore, we can conclude that the electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors under temperature modulation and in combination with the chemometrics methods as an effective and efficient tool can be used for fast and non-destructive classification of black pepper, cinnamon and turmeric samples based on geographical origin.

**Keywords: Electronic nose, Temperature modulation, Spice.**

1. - Panel test [↑](#footnote-ref-1)
2. - Conducting Polymer [↑](#footnote-ref-2)
3. - Bulk Acoustic Wave [↑](#footnote-ref-3)
4. - Surface Acoustic Wave [↑](#footnote-ref-4)
5. - Metal Oxide Semiconductor [↑](#footnote-ref-5)
6. - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor [↑](#footnote-ref-6)
7. - Temperature Modulation [↑](#footnote-ref-7)
8. - Transient response [↑](#footnote-ref-8)
9. - Steady state response [↑](#footnote-ref-9)
10. - Standard normal variates [↑](#footnote-ref-10)
11. - Zero mean [↑](#footnote-ref-11)
12. - Principal component analysis [↑](#footnote-ref-12)
13. - Linear Discriminant Analysis [↑](#footnote-ref-13)
14. - Support Vector Machine [↑](#footnote-ref-14)
15. - Artificial Neural network [↑](#footnote-ref-15)
16. - Levenberg–Marquardt learning algorithm [↑](#footnote-ref-16)
17. - leave one out classification [↑](#footnote-ref-17)
18. - Grid partitioning [↑](#footnote-ref-18)