

## کاربرد بینی الکترونیک به منظور تشخیص تقلب در آب لیمو به کمک روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره

نسیم محمدیان<sup>۱</sup>، امان محمد ضیایی فر<sup>۲</sup>، اسماعیل میرزایی قلعه<sup>۳</sup>، مهدی کاشانی نژاد<sup>۴</sup> و حامد کرمی<sup>۵</sup>

### چکیده

تقلب در مواد غذایی شامل افزودن هر گونه مواد کم‌هزینه به مواد گران‌قیمت برای کاهش محتوای اجزای گران‌قیمت و در نتیجه کاهش هزینه تولید و رسیدن به حداکثر سود است. خطر تقلب در اجزای مواد غذایی با ارزش بالا با جایگزین‌های ارزان‌تر در سال‌های اخیر به مرحله هشدار رسیده است. روش‌های رایج تشخیص تقلب مواد غذایی پرهزینه و زمان‌بر بوده و به تخصص فنی بالایی نیاز دارد. آبلیمو یکی از محصولاتی است که همواره قربانی تقلب تولیدکنندگان برای کاهش قیمت تمام شده محصولات شده است. فن آوری بینی الکترونیکی در بسیاری از زمینه‌ها و اغلب در صنعت نوشیدنی برای اهداف طبقه‌بندی و کنترل کیفیت استفاده می‌شود. این فناوری بر تشخیص و تمایز بین انتشارات ترکیبات آلی فرار از مواد غذایی متکی است. در این مطالعه، آبلیموی خالص به همراه ۱۱ نمونه تقلبی آن (تقلب با آب، تفاله لیمو و کاه گندم) با استفاده از بینی الکترونیک مجهز به ۸ حسگر اکسید فلزی به منظور تشخیص تقلب مورد بررسی قرار گرفت. الگوهای پاسخ حسگرها با استفاده از روش‌های کومتریکس شامل تجزیه و تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA) و تجزیه و تحلیل تفکیک چند متغیره (MDA) بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده از روش‌های QDA و MDA، واریانس کل به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۹۸/۸۹ درصد برای طبقه‌بندی نمونه‌ها به دست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بینی الکترونیک مبتنی بر حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی در ترکیب با روش‌های کومتریکس می‌تواند ابزار مؤثر و با کارایی زیاد در طبقه‌بندی سریع و غیرمخرب آبلیموی خالص از نوع تقلبی آن مورد استفاده قرار گیرد.

### واژه‌های کلیدی: آبلیمو، افزودنی‌های غیر مجاز، ترکیبات آلی فرار، کومتریکس

ارجاع: محمدیان ن. ضیایی فر ا. م. میرزایی قلعه ا. کاشانی نژاد م. و کرمی ح. ۱۴۰۲. کاربرد بینی الکترونیک به منظور تشخیص تقلب در آب لیمو به کمک روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۷: ۱۱۴-۱۰۳. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14102.626>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.  
۲- دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.  
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی.  
۴- استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.  
۵- پژوهشگر و مدرس، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی سقر، دانشگاه رازی.

\* نویسنده مسئول: [ziaifar@gau.ac.ir](mailto:ziaifar@gau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

## مقدمه

تقلب با انگیزه اقتصادی در مواد غذایی عبارت است از جایگزینی یا افزودن عمدی یک ماده در غذا برای منافع مالی (Karami *et al.*, 2020a, Karami, *et al.*, 2020b). چنانچه مصرف‌کننده به موادی که روی برچسب ذکر نشده حساسیت داشته باشد، یا اگر محصول به میکروارگانیسم‌های مضر آلوده شده باشد و یا اگر مواد اضافه شده حاوی اجزای مضر باشد، تقلب صورت گرفته در مواد غذایی ممکن است خطرات بالقوه ای برای سلامتی داشته باشد (Wang *et al.*, 2016).

آب‌لیمو یک ماده اصلی است که نقش‌های مهمی در رژیم غذایی مردم ایفا می‌کند. بسیاری از اجزای طبیعی در لیموترش و آب‌لیمو مانند ویتامین C، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات ضد سرطانی با فواید زیادی برای سلامتی وجود دارد. از آب‌لیمو در آشپزی و مصرف روزانه استفاده می‌شود (Mohammadian *et al.*, 2021). آب‌لیمو همچنین منبع عالی بسیاری از ریزمغذی‌های مهم از جمله ترکیبات فنلی (عمدتاً فلاونوئیدها) و سایر مواد مغذی (ویتامین‌ها، مواد معدنی، فیبرهای غذایی، و روغن‌های ضروری) است که باعث سلامت و تندرستی افراد می‌شود (Lyu *et al.*, 2022). مصرف آب‌لیمو با کاهش فشار خون، سطح کلسترول پلازما و همچنین با درمان‌های بالقوه بیماری‌های ادراری و روانی مرتبط است (Gupta *et al.*, 2021). فلاونوئیدهای مرکبات (مانند نارینژنین، هسپریتین، و اریوسیتین) موجود در آب‌لیمو نیز با پیشگیری از سرطان‌های منتخب انسانی مرتبط هستند (Rodríguez-García *et al.*, 2019).

افزایش تقاضای آب‌لیمو آن را در برابر تقلب آسیب پذیر می‌کند. تقلب‌های مربوط به آب‌لیمو عمدتاً شامل افزودن شکر و آب، پوسته و/یا پالپ واش<sup>۱</sup> و سایر مرکبات است (Lyu *et al.*, 2022).

اجزای اصلی آب‌میوه‌ها، آب، قندها، اسیدهای آلی با مقادیر کم‌تر اسیدهای آمینه، ویتامین‌ها و ترکیبات فنلی هستند. آب‌لیمو تقریباً از ۹ درصد مواد جامد محلول تشکیل شده است. مواد جامد تقریباً ۶۰٪ اسید سیتریک، ۲۰٪ قند، مقادیر جزئی اسید مالیک و سایر اجزا هستند (Mantha *et al.*, 2019). اسیددیده قابل تیتراسیون و محتوای جامدات محلول دو شاخص کیفیت عمده برای

آب‌میوه در صنایع غذایی هستند. اسیددیده کل قابل تیتراسیون شامل تمام مواد اسیدی موجود در آب‌میوه است که با هیدروکسید سدیم واکنش می‌دهند که در بیشتر موارد، این مقدار نشان‌دهنده محتوای اسید آلی یک آب‌میوه است. اسید آلی غالب لیمو اسید سیتریک است. سایر اسیدهای آلی معمولاً در مقادیر کمی در مقایسه با غلظت اسید سیتریک وجود دارند. مواد جامد محلول عمده در آب‌میوه‌ها قندها هستند و کل مواد جامد محلول با استفاده از رفرکتومتر تعیین می‌شود که به آن درجه بریکس<sup>۲</sup> می‌گویند. برای آب‌لیمو، اسید سیتریک به مقدار درجه بریکس کمک می‌کند (Wang *et al.*, 2016).

تقلب در ترکیب آب‌میوه بدون شک اثرات نامطلوبی بر کیفیت آب‌میوه دارد. علاوه بر این، با افزایش جهانی شدن، تأثیر یک رویداد تقلب در مواد غذایی بر جمعیت بزرگ‌تر و گسترده‌تری از همیشه تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که تقلب در آب‌لیمو یک مشکل مداوم است، روش‌های تحلیلی مناسبی برای تشخیص تقلب مورد نیاز است. در حال حاضر، تقاضاهای زیادی برای استفاده از روش‌های سریع همراه با شیمی سنجی برای تعیین تقلب وجود دارد، اما بسیاری از این روش‌ها مانند کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا و کروماتوگرافی گازی هزینه بالایی (به دلیل مصرف حلال) و همچنین به زمان طولانی برای آزمایش نیاز دارند (Mohammadian *et al.*, 2021).

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در مورد توسعه روش‌های غیر مخرب برای اندازه‌گیری صفات کیفی میوه‌ها متمرکز شده است. به طور کلی مفهوم کیفیت از دیدگاه مصرف‌کننده نسبت به غذاها مرتبط است، که مبتنی بر کاربرد حواس پنج‌گانه و به همین دلیل ابزار «برتری» برای تعیین کیفیت، حواس انسان است (Gómez *et al.*, 2006). در صنایع غذایی از بو به طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت توسط کارشناسان خبره استفاده می‌شود. این روش فرآیندی پرهزینه است که مشکلاتی همچون تغییرپذیری پاسخ بین افراد مختلف، زمان‌بر بودن، ذهنی بودن پاسخ کارشناسان نسبت به بوها، تطابق بویایی، و عدم امکان استفاده برای ارزیابی بوهای خطرناک در این روش وجود دارد (Aghili *et al.*, 2022). بینی الکترونیک یکی از روش‌های جدید

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی نمونه

ابتدا لیموی تازه از میادین میوه و تره‌بار کرمانشاه خریداری شد. پس از شستشو، لیمو توسط دستگاه پرسی آب‌گیری، آب‌لیموی خالص استخراج و پس از یک مرحله عبور از صافی، پالپ‌های موجود در آن جدا و آب‌لیموی خالص (LJ) برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه منتقل شد. در این مرحله ۳ سطح مرسوم تقلب آب‌لیمو شامل تقلب با آب، تقلب با کاه گندم و تقلب با تفاله لیمو برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شد. برای تقلب با آب (W) ، ترکیب آب، اسید سیتریک و شکر در سطوح ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد که به ترتیب با نمادهای LW1, LW2, LW3 معرفی شدند به آب‌لیمو اضافه شد. برای تقلب با کاه گندم (S)، ابتدا کاه گندم به مدت ۲۴ ساعت در داخل آب ولرم خیسانده شده تا آب اضافه شده به کاه به رنگ زرد در بیاید. سپس آب لیمو، اسید سیتریک و شکر در ۴ سطح مختلف ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵ که به ترتیب با نمادهای S, LS1, LS2 و LS3 معرفی شدند اضافه شدند. نهایتاً برای تقلب با تفاله لیمو (P)، ابتدا سطوح مختلف تفاله شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵ درصد؛ با افزودن آب‌لیمو، اسید سیتریک و شکر تهیه شد که به ترتیب با نمادهای P, LP1, LP2 و LP3 معرفی شدند.

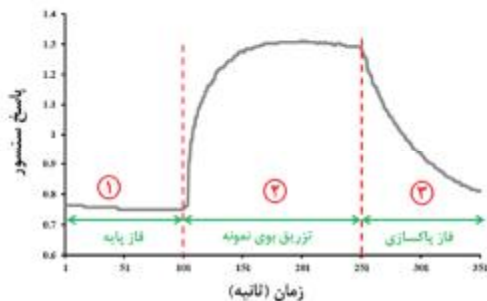
میزان قند با استفاده از رفراکتومتر اندازه‌گیری شد. این کار با قرار دادن مقدار کمی از نمونه بر روی سطح منشور خشک و تمیز رفراکتومتر انجام و مقدار قند در درجه بریکس خوانده و ثبت گردید. لازم به ذکر است نمونه خالص آب‌لیمو دارای بریکس ۸ و برای سایر نمونه‌ها مقدار بریکس در محدوده  $1 \pm 7$  آماده شد.

میزان pH نمونه‌ها با استفاده از pH متر دستی اندازه‌گیری شد. حدود ۲۰ میلی‌لیتر از نمونه در یک فنجان قرار گرفته و سپس الکتروود pH متر در نمونه فرو رفته و pH از روی صفحه نمایش خوانده و ثبت شد. نمونه خالص آب‌لیمو دارای اسیدیته  $2/53$  و برای سایر نمونه‌ها بین  $0/3 \pm 2/3$  اندازه‌گیری شد.

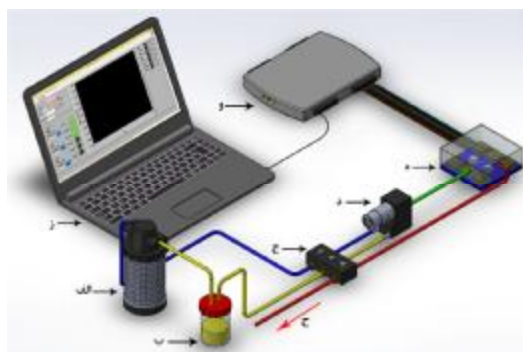
به منظور به حداقل رساندن تغییرات فیزیکی یا شیمیایی، نمونه‌ها تا زمان آغاز آزمایش‌ها در دمای محیط آزمایشگاه با دمای  $1 \pm 22$  درجه سلسیوس و رطوبت نسبی  $5 \pm 35$  درصد نگهداری شدند. برای انجام آزمایشات هر نمونه ۲۵ میلی‌لیتر آب‌لیمو داخل یک بطری شیشه‌ای ۵۰

کنترل کیفی مواد غذایی است (Khorramifar et al., 2022a). این سامانه، حس بویایی انسان را شبیه سازی کرده و به وسیله یک آرایه‌ی حسگری سعی در تشخیص اثر بوی موجود در فضای سر نمونه‌ها دارد (Karami et al., 2021). بینی الکترونیکی دستگاهی است که از یک آرایه چند حسگری و پردازش سیگنال چند بعدی توسط الگوریتم‌های تشخیص الگو تشکیل شده است و می‌تواند حضور ترکیبات فرار مرتبط با عطر مواد غذایی را اندازه‌گیری کند (Khorramifar et al., 2022b). در این روش، فرآیند تحلیلی بر شناسایی و تعیین کمیت ترکیبات فرار متمرکز نیست، بلکه بر توصیف کمی مشخصات کامل رایحه، از جمله روابط بین اجزای آن متمرکز است. در مقایسه با ارزیابی حسی سنتی و روش‌های فیزیکی - شیمیایی، که پرهزینه و زمان‌بر هستند، بینی الکترونیکی یک آزمایش کارآمد، سریع، غیر مخرب و در زمان واقعی را ارائه می‌دهد (Rasekh & Karami, 2021a, 2021b). این روش به طور گسترده برای نظارت بر کیفیت نوشیدنی پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، بینی الکترونیکی با نظارت بر عطر محصول، با موفقیت برای اهداف طبقه بندی و پیش بینی محصولات مختلف شامل آب کیوی (Luo et al., 2016)، نارنگی (Gómez et al., 2006)، آب نارنگی (Qiu et al., 2017)، آب گوجه (Hong et al., 2015)، آناناس (Torri et al., 2010)، آب توت فرنگی (Qiu et al., 2015)، طبقه‌بندی اسانس‌های خوراکی (Rasekh et al., 2021a, 2021b) و تقلب آب‌میوه (Rasekh & Karami, 2021a, 2021b) استفاده شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون مطالعه‌ای جامع برای تشخیص تقلب در آب‌لیمو انجام نشده است و مطالعات مبتنی بر حسگرهای گاز برای کاربردهای تشخیص تقلب در آب‌میوه‌ها و چاشنی‌ها بسیار محدود است. بنابراین هدف از این پژوهش تشخیص تقلب‌های رایج و مورد تأیید سازمان غذا و دارو در آب‌لیمو است. برای انجام این پژوهش محتوای آلی فرار نمونه‌ها به کمک بینی الکترونیک مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۱- ولتاژ خروجی یک حسگر و تقسیم‌بندی مراحل کاری آن (Rasekh et al., 2021b)



شکل ۲- نمودار شماتیک یک سیستم بینی الکترونیکی. (الف) فیلتر هوا (کربن فعال)، (ب) محفظه نمونه، (ج) شیر برقی، (د) پمپ دیافراگمی، (د) آرایه حسگر، (و) کارت اکتساب داده، (ز) رایانه و (ح) خروجی هوا (Karami et al., 2020a)

ولتاژ خروجی حسگرها توسط کارت‌های جمع‌آوری داده جمع‌آوری و سیگنال‌های حسگر با اتصال به USB رایانه و در فواصل ۱ ثانیه ثبت و ذخیره شدند. برای تصحیح خط مینا روش کسری استفاده گردید که در آن نوبه یا انحرافات ممکن حذف و پاسخ‌های حسگرها با استفاده از رابطه کسری نرمال و بدون بعد شدند (Karami et al., 2020b):

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

که در آن  $Y_s(t)$  پاسخ نرمال شده،  $X_s(0)$  خط پایه و  $X^S(t)$  پاسخ حسگر است.

### کمومتریکس

کمومتریکس شاخه‌ای از علم شیمی است که از آمار و ریاضی و منطق برای طراحی و انتخاب فرآیندهای تجربی بهینه استفاده می‌کند. همچنین با تحلیل اطلاعات شیمیایی حداکثر اطلاعات قابل حصول را فراهم می‌کند

میلی لیتری قرار گرفت. بنابراین، ۱۵ ظرف ۲۵ میلی لیتری از هر نمونه آب‌لیمو مورد نظر تهیه در مجموع ۱۸۰ نمونه آب‌لیمو برای آزمایشات تقلب در نظر گرفته شد.

### سامانه بینی الکترونیک

دستگاه مورد استفاده، پیشتر در گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه رازی کرمانشاه ساخته شده (Ayari et al., 2018) که دارای ۸ حسگر اکسید فلزی است و در آن هر حسگر نسبت به ترکیبات فرار شیمیایی یا معطر خاصی حساسیت متقاطع از خود نشان می‌دهد. بوهای مختلف از طریق یک پمپ دیافراگمی به آرایه حسگر ارسال شده و آرایه در معرض ترکیبات معطر قرار می‌گیرد که در آن برهم‌کنش شیمیایی بین عنصر حسگر و مواد فرار منجر به تغییر در ولتاژ الکتریکی می‌شود. این تغییر ولتاژ متناسب با مقدار ماده شیمیایی جذب شده توسط پلیمر رسانا در سطح حسگر است. سیگنال حاصل تغییر در مقاومت عنصر حسگر برای بازه زمانی است که در طی آن در معرض بخارات شیمیایی قرار می‌گیرد. داده‌های خام به‌دست‌آمده شامل تغییرات ولتاژ در هر عنصر آرایه حسگر است، که یک الگوی توزیع یا چاپ بو تولید می‌کند و می‌تواند برای شناسایی ترکیبات آلی فرار با استفاده از روش‌های تشخیص الگو استفاده شود. مراحل کاری بینی الکترونیک از سه مرحله فاز پایه (۱)، تزریق بوی نمونه (۲) و فاز پاکسازی (۳) تشکیل شده است (شکل ۱)، که در مجموع مدت زمان انجام هر آزمایش ۳۲۰ ثانیه است. در مرحله اول، محفظه حسگرها به مدت ۱۰۰ ثانیه با هوای فیلتر شده توسط کربن فعال تمیز شد. در مرحله دوم یا مرحله تشخیص، آرایه حسگر به مدت ۱۲۰ ثانیه در معرض بوی نمونه‌ها (فضای سر نمونه) قرار گرفت. مواد فرار موجود در آب‌لیمو به طور کامل با حسگر در تماس بودند و سیگنال‌های پاسخ را تولید و اطلاعات گاز آب‌لیمو را از طریق کارت جمع‌آوری داده جمع‌آوری کردند. درنهایت در مرحله سوم هوای خالص به مدت ۱۰۰ ثانیه برای پاک‌سازی محفظه حسگرها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱ پاسخ خروجی حسگر نشان داده شده است. همچنین شماتیک دستگاه مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

نمونه‌های TP و FN تعریف می‌شود. دقت، به عنوان نسبت نمونه‌های TP به مجموع نمونه‌های TP و FP تعریف می‌شود و نمرة F، فراخوان و دقت را در نظر می‌گیرد که همگی به شرح زیر محاسبه می‌شوند (Tatli et al., 2022a):

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

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (5)$$

$$\text{AUC} = \frac{\text{Sensitivity} + \text{Precision}}{2} \quad (6)$$

$$F = \frac{2 \times (\text{Precision} \cdot \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (7)$$

### نتایج و بحث

#### پاسخ خروجی حسگرها به بوی نمونه‌ها

در اولین گام، از نمودارهای رادار مانند با شعاع واحد برای مشاهده تفاوت اختلاف الگوها (به عنوان مثال اثر انگشت) بین نمونه‌های قلبی و نمونه اصلی استفاده شد. میانگین داده‌های پاسخ حسگرهای بینی الکترونیک جمع آوری شده در طی ۱۰۰ ثانیه اندازه‌گیری نمونه‌ها، پس از نرمال‌سازی به صورت نمودار رادار رسم شده‌اند. شکل ۳ حداکثر پاسخ را برای هر نوع نمونه نشان می‌دهد. این نمودار کمک می‌کند تا تفاوت‌های میان الگوهای پاسخ معمولی را به راحتی تجسم کنید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت و شباهت قابل توجهی در اثر انگشت نمونه‌ها وجود دارد. همه حسگرها با قرار گرفتن در معرض بوی نمونه‌ها از خود پاسخی نشان می‌دهند که کم‌ترین پاسخ مربوط به بوی نمونه‌های قلبی پوست لیمو است و نمونه قلبی همراه با گندم دارای بیش‌ترین پاسخ است.

پاسخ حسگرها به الگوی بوی فضای سر به شکل میانگین و انحراف معیار در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بیشترین پاسخ مربوط به حسگرهای MQ9، TGS813 و TGS822 و کم‌ترین پاسخ مربوط به حسگرهای MQ3، MQ136 و TGS2602 است. بر این اساس، افزودن حسگرهایی با ویژگی‌های تمایز خوب، توانایی‌های طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد.

(Tatli et al., 2022b). یکی از روش‌های محبوب در کمومتری‌کس روش تجزیه و تحلیل تشخیصی<sup>۱</sup> (DA) است که یک تعمیم تشخیص خطی است. روشی که در آمار، تشخیص الگو و یادگیری ماشین برای یافتن ترکیبی خطی از ویژگی‌هایی که دو یا چند طبقه از اشیا یا رویدادها را مشخص یا جدا می‌کند، استفاده می‌شود (Rasekh et al., 2022). این روش از سه تابع تجزیه و تحلیل تفکیک خطی<sup>۲</sup> (LDA)، تجزیه و تحلیل تفکیک درجه دوم<sup>۳</sup> (QDA) و تجزیه و تحلیل تفکیک چند متغیره<sup>۴</sup> (MDA) تشکیل شده است. این روش ارتباط نزدیکی با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی دارد زیرا هر دو به دنبال ترکیب‌های خطی متغیرهایی هستند که داده‌ها را به بهترین شکل توضیح می‌دهند. البته تجزیه و تحلیل خطی معمولاً تأثیر طبقه‌بندی بهتری نسبت به تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی دارد (Khorramifar et al., 2021, Khorramifar et al., 2022).

در ادامه برای تشخیص سطوح مختلف تقلب آبلیمو به طور عملی که آیا توسط بینی الکترونیکی قابل تشخیص است یا خیر از دو روش (QDA) و (MDA) استفاده شد.

#### معیارهای ارزیابی مدل

معیارهای ارزیابی مدل برای ارزیابی عملکرد الگوریتم در یادگیری تحت نظارت استفاده می‌شود. برای تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم از معیارهای متداول شامل ویژگی<sup>۵</sup>، دقت<sup>۶</sup>، حساسیت<sup>۷</sup> یا فراخوانی<sup>۸</sup>، صحت<sup>۹</sup> و نمرة F استفاده شد. همچنین از یک ماتریس اغتشاش با عوامل مثبت واقعی (TP)، مثبت کاذب (FP)، منفی واقعی (TN) و منفی کاذب (FN) برای محاسبه معیارها استفاده گردید.

صحت، نشان دهنده نسبت نمونه‌هایی است که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند (شامل نمونه‌های TP و TN). فراخوانی، به عنوان نسبت نمونه‌های TP به مجموع

1- Discriminant Analysis

2- Linear Discriminant Analysis

3- Quadratic Discriminant Analysis

4- Multivariate discrimination analysis

5- Specificity

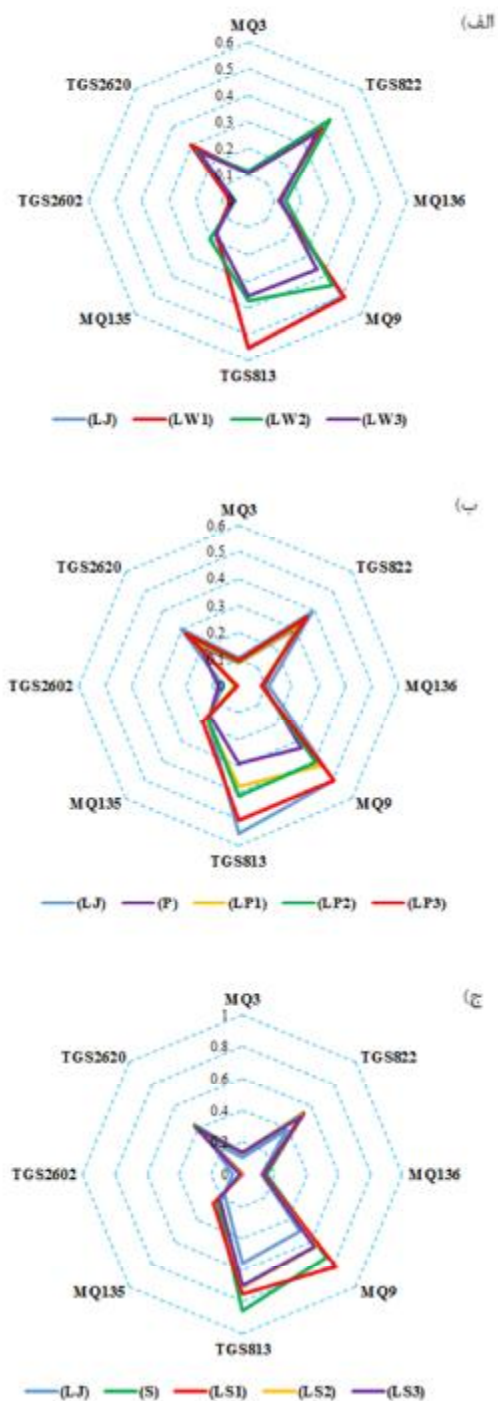
6- Precision

7- Sensitivity

8- Recall

9- Accuracy

توجه به معادلات (۲) تا (۷) می‌توان عوامل عملکردی روش‌های QDA و MDA در تشخیص تقلب در آب‌لیمو را به دست آورد. این نتایج در جدول ۱ و ۲ خلاصه شده است.



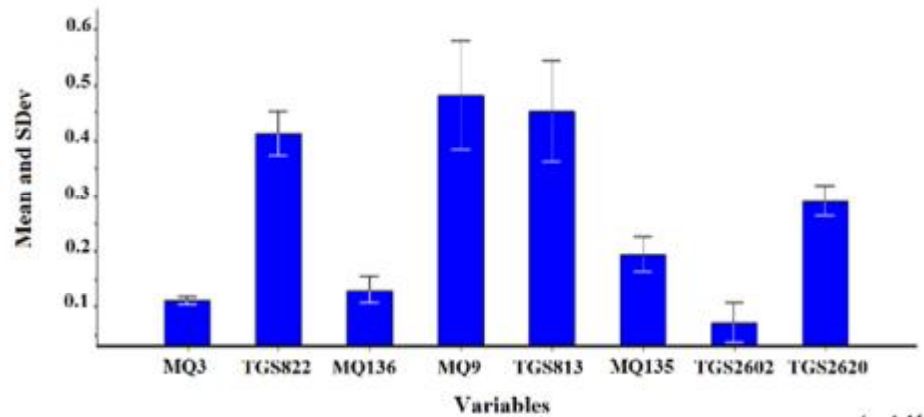
شکل ۳- نمودار رادار پاسخ حسگرها؛ الف) تقلب با آب، ب) تقلب با پوست لیمو، ج) تقلب با کاه گندم

حسگرهای MQ9، TGS813 و TGS822 قوی‌ترین و مؤثرترین حسگرها در طبقه‌بندی انواع مختلف تقلب بودند. دانستن پاسخ هر حسگر به ترکیبات آلی فرار نمونه‌های تقلب آب‌لیمو می‌تواند به تشخیص سطوح مختلف تقلب ایجاد شده در آب‌لیمو کمک کند. بر این اساس، می‌توان مهم‌ترین و مؤثرترین حسگرها را با حداکثر پاسخ به مواد فرار در نمونه‌های اصلی و تقلبی در حسگرهای آرایه بینی الکترونیکی انتخاب کرد. علاوه بر این، انتخاب حسگرهایی با قوی‌ترین پاسخ به کاهش زمان پاسخ‌دهی سامانه کمک می‌کند. از سوی دیگر، دسترسی به مهم‌ترین حسگرها می‌تواند نقش مهمی در مرحله پردازش داده‌ها داشته باشد، زیرا متغیرهای اضافی در داده‌ها گاهی اوقات می‌توانند منجر به مشکلاتی مانند تجزیه و تحلیل بیش از حد داده‌ها شوند. حسگرهای با انتخاب‌پذیری ضعیف بر قدرت تمایز آرایه تأثیر منفی می‌گذارد. آگاهی از قدرت تمایز آرایه حسگر می‌تواند تصمیم‌گیری را برای انتخاب مناسب‌ترین حسگرها تسهیل کند. در نهایت، نتیجه‌گیری می‌شود که آرایه حسگر انتخاب شده برای طبقه‌بندی کیفی مبتنی بر بویایی انواع مختلف آب لیمو مؤثر است و می‌تواند در ساخت یک سیستم مطلوب بویایی ماشین استفاده شود.

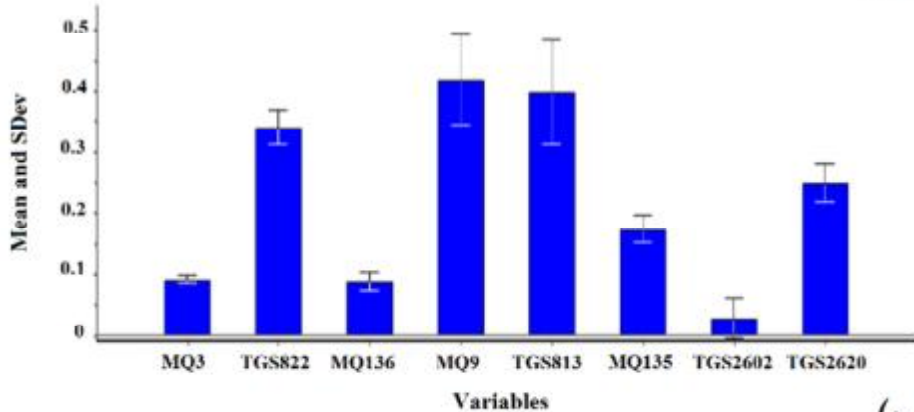
### تجزیه و تحلیل خطی

در روش‌های ذکر شده برای تشخیص تقلب در آب‌لیمو، طبقه بندی ۱۲ گروه آب‌لیمو انجام شد (شکل ۵). ورودی‌های مدل دارای وزن یک بودند. از شکل ۴-الف و ۴-ب مشاهده می‌شود که در دو تابع متمایز اول برای روش‌های QDA و MDA واریانس کل به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۹۸/۸۹ درصد برای طبقه‌بندی نمونه‌ها در ۱۲ گروه به دست آمد. هر چه پراکندگی بین نقاط جمع‌آوری داده‌ها بیشتر باشد، تمایز گروهی بالاتر است.

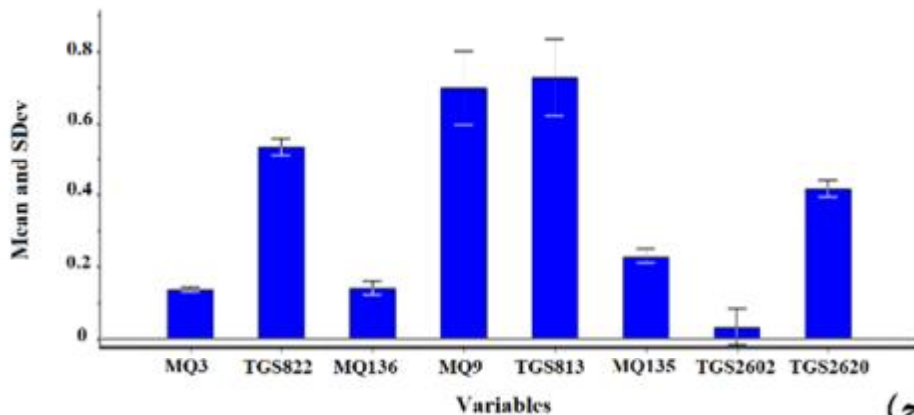
ماتریس اغتشاش عوامل عملکردی روش‌های QDA و MDA در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، از مجموع میانگین ۱۸۰ داده آب‌لیمو در روش QDA تمامی نمونه‌ها به درستی تشخیص داده شده‌اند و دقت برابر ۱۰۰ درصد است. همچنین در روش MDA تنها ۲ داده به اشتباه تشخیص داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تمام نمونه‌ها بجز نمونه LW3 به درستی تشخیص داده شده‌اند. با



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- میانگین پاسخ حسگرها در مقابل الگوی بوی فضای سر نمونه؛ الف) تقلب با آب، ب) تقلب با پوست لیمو، ج) تقلب با کاه گندم

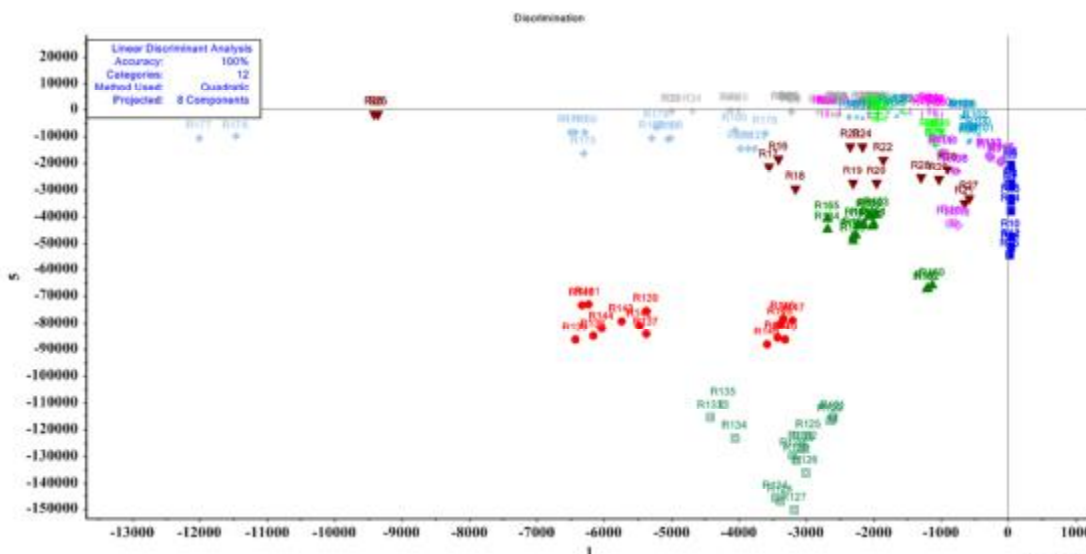
الکترونیکی استفاده شد، طبق نتایج به دست آمده دقت دو روش LDA و QDA بیش از ۹۵٪ به دست آمد (Cerrato Oliveros *et al.*, 2002). در تحقیقی دیگر برای طبقه‌بندی سیب بر اساس زمان نگهداری با استفاده از پاسخ فرکانس دقت طبقه‌بندی برای مدل‌های LDA و QDA به ترتیب برابر با ۸۰/۵۶٪ و ۸۳/۳۳٪ به دست آمد

در تحقیقی طبقه‌بندی عمر مفید روغن خوراکی به مدت ۱۵۰ روز مورد مطالعه صورت گرفت، بر اساس نتایج به دست آمده دقت طبقه‌بندی برابر با ۹۵٪ و ۹۴/۴٪ به ترتیب برای روش‌های QDA و LDA گزارش شد (Karami *et al.*, 2020b). در یک تحقیق برای تشخیص تقلب روغن زیتون بکر با استفاده از یک بینی

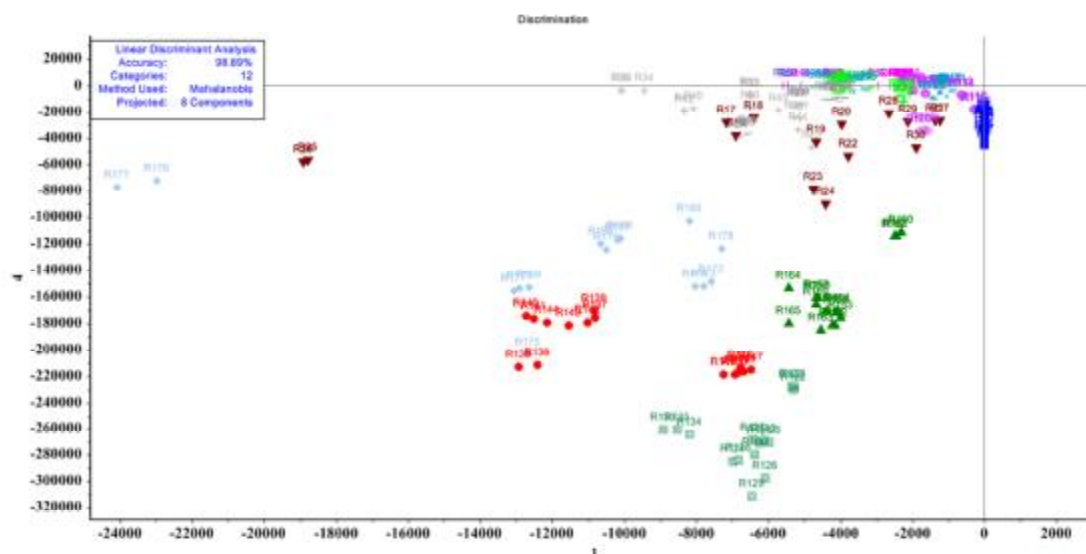
PCA، LDA و QDA و SVM، نمونه‌ها با دقت بسیار بالایی نزدیک به ۱۰۰ درصد طبقه بندی شدند (Rasekh *et al.*, 2021a). همچنین در تحقیقی دیگر که به کمک بینی الکترونیک انجام شد محققین دقت ۱۰۰٪ را در شناسایی رایحه نعناع با استفاده از روش LDA گزارش کرده‌اند. در مطالعه‌ای، با استفاده از بینی الکترونیکی تقلب در آب‌میوه‌های خالص و صنعتی تشخیص داده شد (Rasekh and Karami, 2021b).

(Lashgari & MohammadiGol, 2016). در تحقیقی برای طبقه‌بندی ۱۲ گروه گیاه ریحان بر اساس مقدار اوره مصرفی با استفاده از روش‌های LDA و QDA به ترتیب دقت ۹۵ و ۹۷/۷۸ درصدی گزارش شد (Khodamoradi *et al.*, 2021).

در پژوهشی، به کمک بینی الکترونیک مجهز به ۹ حسگر اکسید فلزی برای تمایز بین اسانس‌های فرار مشتق شده از میوه‌ها و منابع گیاهی خوراکی به کمک روش‌های



(الف)



(ب)

■ LJ ▼ LW1 + LW2 | LW3 - P + LP1 × LP2 ○ LP3 □ S ● LS1 ▲ LS2 ◆ LS3

شکل ۵- نتایج تحلیل خطی برای تشخیص تقلب در آب‌لیمو با استفاده از (الف) QDA و (ب) MDA



LS3	LS2	LS1	S	LP3	LP2	LP1	P	LW3	LW2	LW1	LJ	نمونه‌ها
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	آب لیمو (LJ)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ آب (LW1)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ آب (LW2)
*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ آب (LW3)
*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	تفاله لیمو (P)
*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ تفاله (LP1)
*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ تفاله (LP2)
*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ تفاله (LP3)
*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	کاه گندم (S)
*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ کاه (LS1)
*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ کاه (LS2)
۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ درصد کاه (LS3)

شکل ۶- ماتریس اغتشاش به دست آمده از مدل QDA

LS3	LS2	LS1	S	LP3	LP2	LP1	P	LW3	LW2	LW1	LJ	نمونه‌ها
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	آب لیمو (LJ)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ آب (LW1)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ آب (LW2)
*	*	*	*	*	*	*	*	۱۳	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ آب (LW3)
*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	تفاله لیمو (P)
*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ تفاله (LP1)
*	*	*	*	*	۱۵	*	*	۲	*	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ تفاله (LP2)
*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ تفاله (LP3)
*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	کاه گندم (S)
*	*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ کاه (LS1)
*	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ کاه (LS2)
۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ درصد کاه (LS3)

شکل ۷- ماتریس اغتشاش به دست آمده از مدل MDA

جدول ۱- عوامل عملکردی مدل QDA برای طبقه‌بندی نمونه‌های آب لیمو

F	فراخوانی	ویژگی	حساسیت	دقت	صحت	نمونه‌ها
۱	۱	۱	۱	۱	۱	آب لیمو (LJ)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ آب (LW1)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ آب (LW2)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ آب (LW3)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	تفاله لیمو (P)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ تفاله (LP1)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ تفاله (LP2)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ تفاله (LP3)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	کاه گندم (S)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ کاه (LS1)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ کاه (LS2)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ درصد کاه (LS3)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	میانگین

جدول ۲- عوامل عملکردی مدل مدل MDA برای طبقه‌بندی نمونه‌های آب لیمو

نمونه‌ها	صحت	دقت	حساسیت	ویژگی	فراخوانی	F
آب لیمو (L)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ آب (LW1)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ آب (LW2)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ آب (LW3)	۰/۹۸۹	۱	۰/۸۶۷	۱	۱	۰/۹۳۹
تفاله لیمو (P)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ تفاله (LP1)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ تفاله (LP2)	۰/۹۸۹	۰/۸۸۲	۱	۰/۹۸۸	۰/۹۳۵	۰/۹۳۸
۷۵٪ لیمو و ۲۵٪ تفاله (LP3)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کاه گندم (S)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۵٪ لیمو و ۷۵٪ کاه (LS1)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۵۰٪ لیمو و ۵۰٪ کاه (LS2)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۷۵ درصد لیمو و ۲۵ درصد کاه (LS3)	۱	۱	۱	۱	۱	۱
میانگین	۰/۹۹۸	۰/۹۹۰	۰/۹۸۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۵	۰/۹۸۹

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه توانایی یک بینی الکترونیکی قابل حمل مجهز به ۸ حسگر اکسید فلزی برای تشخیص تقلب آب لیمو بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده از روش‌های QDA و MDA واریانس کل به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۹۸/۸۹ درصد برای طبقه‌بندی نمونه‌ها به دست آمد. این نتایج نشان داد که کاربرد بینی الکترونیکی در ترکیب با روش‌های کمومتریکس می‌تواند یک رویکرد امیدوارکننده در تشخیص موفقیت‌آمیز تقلب در آب لیمو باشد. این روش نسبت به روش‌های استاندارد مرسوم برای تشخیص تقلب در نوشیدنی‌ها برتری دارد، زیرا یک روش غیر مخرب است که منجر به صرفه جویی در زمان می‌شود و استفاده از حلال‌های آلی سمی را نیز کاهش می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از بینی الکترونیکی پیشنهاد شده می‌تواند وابستگی به افراد ارزیاب بویایی یا تجزیه و تحلیل داده‌های زمان‌بر برای تشخیص تقلب در نمونه‌های آب لیمو را کاهش دهد و برای کنترل کیفیت برخط نیز مفید است. با انجام این کار، مصرف‌کنندگان تا حد مناسبی از خرید محصولات تقلبی در امان خواهند ماند. با توجه به تمامی این محدودیت‌ها و بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه و مطالعات قبلی، شواهد کافی برای تأیید این موضوع وجود دارد که فناوری‌های بینی الکترونیکی ابزارهای مؤثری برای تشخیص سریع و تأیید (احراز هویت) در صنایع غذایی هستند.

### سپاسگزاری

از حمایت‌های دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و دانشگاه رازی تقدیر و تشکر می‌شود.

### منابع

- Aghili, N.S., Rasekh, M., Karami, H., Azizi, V., & Gancarz, M. (2022). Detection of fraud in sesame oil with the help of artificial intelligence combined with chemometrics methods and chemical compounds characterization by gas chromatography-mass spectrometry. *LWT- Food Science and Technology*, 167, 113863.
- Ayari, F., Mirzaee- Ghaleh, E., Rabbani, H., & Heidarbeigi, K. (2018). Using an E-nose machine for detection the adulteration of margarine in cow ghee. *Journal of Food Process Engineering*, 41(6), e12806.
- Cerrato Oliveros, M. C., Pérez Pavón, J. L., García Pinto, C., Fernández Laespada, M. E., Moreno Cordero, B., & 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(2): 219-228.
- Gómez, A. H., Wang, J., Hu, G., & Pereira, A. G. (2006). Electronic nose technique potential monitoring mandarin maturity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(1): 347-353.
- Gupta, S., Rahman, M. A., & Sundaram, S. (2021). Citrus fruit as A potential source of phytochemical, antioxidant and

- Iran Agricultural Research*, 35(2): 65-70. (In Persian)
- Luo, Y., Li, Z., Yuan, Y., & Yue, T. (2016). Bioadsorption of patulin from kiwi fruit juice onto a superior magnetic chitosan. *Journal of Alloys and Compounds*, 667: 101-108.
- Lyu, W., Yuan, B., Liu, S., Simon, J. E., & Wu, Q. (2022). Assessment of lemon juice adulteration by targeted screening using LC-UV-MS and untargeted screening using UHPLC-QTOF/MS with machine learning. *Food Chemistry*, 373, 131424.
- Mantha, M., Kubachka, K. M., Urban, J. R., Dasenbrock, C. O., Chernyshev, A., Mark, W. A., & Qi, H. (2019). Economically Motivated Adulteration of Lemon Juice: Cavity Ring Down Spectroscopy in Comparison with Isotope Ratio Mass Spectrometry: Round-Robin Study. *Journal of AOAC International*, 102(5): 1544-1551.
- Mohammadian, A., Barzegar, M., & Mani-Varnosfaderani, A. (2021). Detection of fraud in lime juice using pattern recognition techniques and FT-IR spectroscopy. *Food Science & Nutrition*, 9(6): 3026-3038.
- Qiu, S., Wang, J., & Du, D. (2017). Assessment of high pressure processed mandarin juice in the headspace by using electronic nose and chemometric analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 42: 33-41.
- Qiu, S., Wang, J., & Gao, L. (2015). Qualification and quantization of processed strawberry juice based on electronic nose and tongue. *Lwt - Food Science and Technology*, 60(1): 115-123.
- Rasekh, M., & Karami, H. (2021a). Application of electronic nose with chemometrics methods to the detection of juices fraud. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15432.
- Rasekh, M., & Karami, H. (2021b). E-nose coupled with an artificial neural network to detection of fraud in pure and industrial fruit juices. *International Journal of Food Properties*, 24(1): 592-602.
- Rasekh, M., Karami, H., Fuentes, S., Kaveh, M., Rusinek, R., & Gancarz, M. (2022). Preliminary study non-destructive sorting techniques for pepper (*Capsicum annum* L.) using odor parameter. *LWT- Food Science and Thecnology*, 164: 113667.
- Rasekh, M., Karami, H., Wilson, A. D., & Gancarz, M. (2021a). Classification and Identification of Essential Oils from Herbs and Fruits Based on a MOS Electronic-Nose Technology. *Chemosensors*, 9(6): 142.
- Rasekh, M., Karami, H., Wilson, A. D., & Gancarz, M. (2021b). Performance Analysis pharmacological ingredients. *Journal of Science and Healthcare Exploration (JSHE)* ISSN, 2581, 8473.
- Hong, X., Wang, J., & Qi, G. (2015). E-nose combined with chemometrics to trace tomato-juice quality. *Journal of Food Engineering*, 149: 38-43.
- Karami, H., Rasekh, M., & Mirzaee - Ghaleh, E. (2020a). Comparison of chemometrics and AOCS official methods for predicting the shelf life of edible oil. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 206, 104165.
- Karami, H., Rasekh, M., & Mirzaee-Ghaleh, E. (2020b). Application of the E-nose machine system to detect adulterations in mixed edible oils using chemometrics methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), e14696.
- Karami, H., Rasekh, M., & Mirzaee-Ghaleh, E. (2020c). Qualitative analysis of edible oil oxidation using an olfactory machine. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(5): 2600-2610.
- Karami, H., Rasekh, M., & Mirzaee-Ghaleh, E. (2021). Identification of olfactory characteristics of edible oil during storage period using metal oxide semiconductor sensor signals and ANN methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15749.
- Khodamoradi, F., Mirzaee-Ghaleh, E., Dalvand, M. J., & Sharifi, R. (2021). Classification of basil plant based on the level of consumed nitrogen fertilizer using an olfactory machine. *Food Analytical Methods*, 14: 2617-2629.
- Khorramifar, A., Karami, H., Wilson, A.D., Sayyah, A.H.A., Shuba, A., & Lozano, J. (2022b). Grape Cultivar Identification and Classification by Machine Olfaction Analysis of Leaf Volatiles. *Chemosensors*, 10, 125,
- Khorramifar, A., Rasekh, M., Karami, H., Covington, J.A., Derakhshani, S.M., Ramos, J., & Gancarz, M. (2022a). Application of MOS Gas Sensors Coupled with Chemometrics Methods to Predict the Amount of Sugar and Carbohydrates in Potatoes. *Molecules*, 27, 3508,
- Khorramifar, A., Rasekh, M., Karami, H., Malaga-Tobola, U., & Gancarz, M. (2021). A Machine Learning Method for Classification and Identification of Potato Cultivars Based on the Reaction of MOS Type Sensor-Array. *Sensors*, 21(17): 5836.
- Lashgari, M., & MohammadiGol, R. (2016). Discrimination of Golab apple storage time using acoustic impulse response and LDA and QDA discriminant analysis techniques.

- of MAU-9 Electronic-Nose MOS Sensor Array Components and ANN Classification Methods for Discrimination of Herb and Fruit Essential Oils. *Chemosensors*, 9(9): 243.
- Rodríguez-García, C., Sánchez-Quesada, C., & Gaforio, J. J. (2019). Dietary flavonoids as cancer chemopreventive agents: An updated review of human studies. *Antioxidants*, 8(5), 137.
- Tatli, S., Mirzaee-Ghaleh, E., Rabbani, H., Karami, H., & Wilson, A. D. (2022a). Rapid Detection of Urea Fertilizer Effects on VOC Emissions from Cucumber Fruits Using a MOS E-Nose Sensor Array. *Agronomy*, 12(1): 35.
- Tatli, S., Mirzaee-Ghaleh, E., Rabbani, H., Karami, H., Wilson, A.D. (2022b). Prediction of Residual NPK Levels in Crop Fruits by Electronic-Nose VOC Analysis following Application of Multiple Fertilizer Rates. *Applied Sciences*, 12, 11263.
- Torri, L., Sinelli, N., & Limbo, S. (2010). Shelf life evaluation of fresh-cut pineapple by using an electronic nose. *Postharvest Biology and Technology*, 56(3): 239-245.
- Wang, Z., & Jablonski, J. E. (2016). Targeted and non-targeted detection of lemon juice adulteration by LC-MS and chemometrics. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 33(3): 560-573.