

مقاله پژوهشی

به کارگیری سامانه بینی الکترونیک به منظور درجه‌بندی کیفی چای سیاه ایرانی

سید حسین پیمان^{۱*}، عادل بخشی پور زیارتگاهی^۲، علیرضا ثنائی^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۳. دانش‌آموخته دکتری، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۹۷/۶/۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۸/۲۸، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۲)

چکیده

چای یکی از محصولات استراتژیک شمال ایران به‌شمار می‌رود. چای تولید شده در کارخانجات چای‌سازی، تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر شرایط آب و هوایی در دوره رشد، خاک، زمان برداشت، و همچنین روش‌های فراوری و آماده‌سازی، دارای کیفیت‌های متفاوت می‌باشد. علاوه بر خصوصیات ظاهری، از دیگر ویژگی‌های مهم چای، ترکیبات شیمیایی و خصوصیات عطری آن هستند. بررسی روش‌های جدید و دقیق در زمینه پایش کیفی چای، تاثیر به‌سزایی در پیشرفت صنایع تبدیلی در حوزه چای دارد. در این پژوهش از یک سامانه بینی الکترونیک به‌منظور استخراج ویژگی‌های مربوط به عطر چای و به‌کارگیری این ویژگی‌ها برای طبقه‌بندی کیفی چای سیاه استفاده شد. ویژگی‌های استخراج شده از یک آرایه حسگری شامل ده حسگر گازی مختلف اکسید فلزی، برای طبقه‌بندی پنج گروه کیفی چای سیاه به کمک روش‌های کمومتریک استفاده شدند. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد طبقه‌بندی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت طبقه‌بندی کلی ۸۸٪ به‌دست آمد. روش آنالیز تشخیصی خطی و ماشین بردار پشتیبان به ترتیب دقت‌هایی برابر با ۷۸ و ۸۶/۶۷٪ را منتج شدند. همچنین براساس نتایج روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، مشخص شد که حسگرهای MQ7 بیش‌ترین تاثیر را در جداسازی گروه‌های کیفی چای داشت. به‌طور کلی، عملکرد سامانه بینی الکترونیک در طبقه‌بندی کیفی چای سیاه ایرانی، مناسب بود.

واژه‌های کلیدی: بینی الکترونیک، چای سیاه، حسگرهای اکسید فلزی، طبقه‌بندی کیفی، کمومتریک.

۱. مقدمه

است که بسیار تحت تاثیر تغییر ترکیبات تشکیل دهنده آن ماده غذایی است. بنابراین می‌توان از سنجش بو به‌عنوان روشی پیشرفته و موثر برای کسب اطلاعات متغیرهای تاثیرگذار بر کیفیت مواد خوراکی استفاده کرد [۱۰]. بینی الکترونیک^۱ سامانه‌ای برای تشخیص و تمیز دادن میان بوهای تشکیل دهنده یک رایحه، با استفاده از آرایه‌ای از حسگرها است. بینی الکترونیکی یا ماشین بویایی^۲، بر اساس پاسخ حسگرهای شیمیایی به تشخیص و درک بوهای پیچیده پرداخته و حس بویایی انسان را تقلید می‌کند. در یک سامانه بینی الکترونیک، بوی ساطع شده از مواد مورد آزمایش به آرایه حسگرها که عموماً الکترودهای اکسید فلزی یا پلیمرها هستند رسیده و هر حسگر با توجه به نوع گازی که به آن حساس است، سیگنالی را ارسال می‌کند. این آرایه سیگنال‌ها در پردازش‌گر مورد بررسی قرار گرفته و تشخیص و طبقه‌بندی بو انجام می‌شود [۱۱].

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه کاربرد بینی الکترونیکی در تعیین خصوصیات کیفی محصولات کشاورزی و مواد غذایی انجام گرفته است. در بررسی عملکرد یک سامانه بینی الکترونیک بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی^۳ (MOS) به‌منظور پایش رسیدگی موز، از تحلیل تفکیک خطی^۴ (LDA) برای طبقه‌بندی نمونه‌های موز بر اساس ویژگی‌های استخراجی از سیگنال‌های بینی الکترونیک استفاده شد و دقتی معادل با ۹۷/۳٪ در طبقه‌بندی موز بر اساس طول دوره نگهداری گزارش شد [۱۲]. همچنین کاربردهای سامانه‌های بینی الکترونیک با استفاده از حسگرهای گوناگون در تعیین کیفیت محصولات کشاورزی و مواد غذایی گزارش شده‌اند [۱۸-۱۳].

بینی الکترونیکی با موفقیت به منظور پایش دوره تخمیر چای و تاثیر مدت زمان تخمیر بر کیفیت چای سیاه به‌کار برده شد [۱۹]. همچنین عملکرد یک سامانه بینی الکترونیک شامل ۱۰ حسگر گازی اکسید فلزی برای طبقه‌بندی پنج درجه مختلف کیفی چای سبز چینی مورد ارزیابی قرار گرفت و بیش‌ترین دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی چای سبز بر اساس خصوصیات استخراج شده از بینی الکترونیک برابر با ۸۸٪ گزارش شد [۷].

چای (Camellia Sinensis) یکی از گیاهان مهم در جهان است که برای تهیه نوشیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان تولید جهانی چای (سیاه، سبز) از مقدار ۴/۶۲ MT در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۵/۹۵ MT در سال ۲۰۱۶ رسیده است [۱]. در ایران نیز به‌دلیل شرایط آب و هوایی مناسب برای کشت چای، سطح زیر کشتی معادل ۳۲۰۰۰ ha از مزارع در شمال کشور به کشت این محصول اختصاص دارد که بیش از ۹۰٪ باغ‌های چای کشور در استان گیلان و باقی در منطقه کوچکی از غرب مازندران پراکنده است [۲]. بر اساس آمار فائو، میزان تولید چای در ایران در سال ۲۰۱۶ برابر با ۷۵۰۰۰ T گزارش شده است [۱]. بیش‌ترین چای تولیدی جهان چای سیاه (چای تخمیری) است که از برگ‌های سبز چای و پس از انجام عملیات پلاس^۱، مالش^۲، تخمیر^۳ و خشک کردن^۴ به‌دست می‌آید [۳]. کیفیت و ظاهر محصول چای سیاه نهایی تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر شرایط آب و هوای در دوره رشد، خاک، زمان برداشت، و همچنین روش‌های فراوری و آماده‌سازی می‌باشد [۴].

ارزیابی کیفی چای به‌طور معمول به صورت آزمون حسی و توسط افراد خبره صورت می‌گیرد که نمونه‌های چای را براساس عطر، رنگ، بافت و مورفولوژیکی ارزیابی می‌کنند [۵، ۶]. این نوع بازرسی بسیار موثر، اما خسته‌کننده، وقت‌گیر و گران است. علاوه بر این، نتایج ارزیابی می‌تواند تحت تاثیر شرایط جسمانی و روانی ارزیابی کنندگان قرار گیرد [۷]. از سوی دیگر، در کارخانجات تولید چای، چای سیاه تولید شده پس از عبور از الک‌هایی، با توجه به اندازه ذرات جداسازی می‌شود و عموماً این گروه‌های اندازه‌ای استاندارد چای که در استاندارد شماره ۵۳۶۰ موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران نیز ارائه شده‌اند [۸]، معیار ارزش‌گذاری چای قرار می‌گیرند. سیستم‌های درجه‌بندی کیفی محصولات کشاورزی به‌طور عمده سیستم‌های درجه‌بندی کیفی مبتنی بر خواص ظاهری و سیستم‌های درجه بندی کیفی مبتنی بر ارزیابی کیفی درونی محصولات هستند که روش دوم امتیاز برجسته‌ای در سال‌های اخیر پیدا کرده است [۹].

یکی از ویژگی‌های مهم مواد غذایی بوی ساطع شده از آن‌ها

۱. Withering
۲. Rolling
۳. Fermentation
۴. Drying

1. Electronic nose
2. Machine olfaction
3. Metal oxide semiconductor
4. Linear discriminant analysis

۲. بخش مواد و روش‌ها

۱.۲. تهیه نمونه‌ها

آزمایش‌ها بر روی پنج گروه مختلف کیفی چای سیاه ایرانی انجام شد. نمونه‌های چای سیاه ایرانی از یکی از کارخانجات فراوری چای در شهرستان لاهیجان تهیه شدند. تمامی نمونه‌ها متعلق به محصول یک روز یک کارخانه بودند تا شرایط اولیه مشابهی داشته باشند. درجه کیفی نمونه‌های چای سیاه با توجه به استاندارد ارائه شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران [۸] تعیین شد. نام و نشانه این گروه‌های کیفی در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

برای هر گروه کیفی چای تعداد ۸ نمونه 150 ± 5 g تهیه شد. به منظور پیش‌گیری از ایجاد هرگونه تغییر ظاهری و کیفی در نمونه‌های چای، نمونه‌ها تا زمان داده‌برداری در بسته‌های پلاستیکی در بسته و در دمای ۲۵ تا ۲۸ °C نگهداری شدند.

۲.۲. سامانه بینی الکترونیک و دریافت داده

سامانه بینی الکترونیک پژوهش حاضر بر پایه حسگرهای MOS پیاده‌سازی شد. این حسگرها کمیت‌های شیمیایی را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند. از جمله مزایای حسگرهای MOS می‌توان به حساسیت و پایداری شیمیایی بالای این حسگرها و هزینه پایین اشاره کرد. نام و خصوصیات حسگرهای استفاده شده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است.

سایر قسمت‌های سامانه بینی الکترونیک این پژوهش، شامل؛ الف) محفظه قرارگیری نمونه‌های چای، ب) محفظه قرارگیری آرایه حسگرهای گازی، ج) دو شیر برقی دو راهه ۱۲ V، ۱/۴ in، ساخت کشور آلمان به منظور کنترل جریان هوا و رایحه انتشار یافته از نمونه‌ها به محفظه حسگرها، د) یک پمپ هوای دیافراگمی ۲۴ V مدل MV-SD820، ساخت شرکت Sypda کشور چین با تنظیم دبی به اندازه ۳ lit/min برای تزریق هوا به محفظه حسگرها و یک پمپ هوای ۶V مدل MAP-1704، ساخت شرکت Mitsumi کشور ژاپن با تنظیم دبی به اندازه ۰/۵ lit/min برای تزریق رایحه نمونه‌ها به محفظه حسگرها، ه) صفحه الکترونیکی طراحی شده جهت مدار بندی حسگرها، شیرها و پمپ‌ها، و) فیلتر بوگیر و نم‌گیر برای پاکسازی هوای محیط قبل از ورود به محفظه حسگرها، ز) شلنگ‌های گاز، ح) بخش آنالیز داده‌ها و تشخیص الگو، بود. هم‌چنین از حسگر دما و رطوبت

در پژوهشی از بینی الکترونیک به منظور طبقه‌بندی کیفی چای استفاده شد و نتایج طبقه‌بندی کیفی چای برای ۶ درجه کیفی مختلف چای هندی با نتایج گزارش شده توسط متخصص تست چای مقایسه شد. بیش‌ترین دقت سامانه ارائه شده کم‌تر از ۸۵٪ گزارش شد [۲۰].

در تحقیق دیگری از یک سامانه بینی الکترونیکی مجهز به حسگرهای تصویرسازی بول‌به‌منظور جداسازی سه نوع چای دم کرده سبز، سیاه و اولانگ استفاده شد. حسگرهای مورد استفاده در این پژوهش به گونه‌ای بودند که با توجه به نوع و غلظت مواد شیمیایی موجود در رایحه نمونه‌ها دچار تغییر شکل می‌شدند. میزان تغییرات سه مؤلفه رنگی قرمز، سبز و آبی در حسگرهای تصویری اندازه‌گیری شده و از آنالیز چند متغیره برای طبقه‌بندی نمونه‌های چای استفاده شد. دقت طبقه‌بندی با روش تحلیل تفکیک خطی برای جداسازی دم‌کرده سه گروه چای برابر با ۱۰۰٪ گزارش شد [۲۱].

در پژوهشی دیگر، از تکنیک بینی الکترونیک برای تشخیص کیفیت چای به جای تست انسانی استفاده شد. چهار درجه کیفی مختلف از چای سبز که بر اساس آزمون‌های حسی توسط شخص خبره طبقه‌بندی شده بودند، در آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ابتدا از یک سیستم بینی الکترونیک با هشت حسگر گازی اکسید فلزی برای داده‌برداری از رایحه نمونه‌های چای سبز استفاده شد. سپس از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور استخراج مؤلفه‌های بهینه استفاده شد. در نهایت از سه روش مختلف؛ K (تا) نزدیک‌ترین همسایه (KNN)^۲، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ (ANN) و ماشین بردار پشتیبان^۴ (SVM) برای طبقه‌بندی کیفی چای سبز استفاده شد. دقت سامانه طبقه‌بندی در داده‌های ارزیابی، برابر با ۹۵٪ گزارش شد [۲۲].

با توجه به اهمیت بررسی روش‌های نوین سنجش کیفیت مواد غذایی و با در نظر گرفتن این نکته که تاکنون پژوهشی در راستای بررسی عملکرد سامانه بینی الکترونیک به منظور طبقه‌بندی کیفی چای سیاه ایرانی صورت نگرفته، این پژوهش به بررسی توانایی تکنولوژی بینی الکترونیک برای طبقه‌بندی کیفی چای سیاه ایرانی می‌پردازد.

1. Odor imaging sensors
2. K-nearest neighbors
3. Artificial neural networks
4. Support vector machine

جدول (۱) گروه‌های کیفی نمونه‌های چای مورد بررسی.

Table 1 Qualitative categories of evaluated black tea samples.

گروه چای Tea Category	نام گروه چای Tea category name	خلاصه اسم Abbreviation
A1	چای قلم Orange Pekoe	OP
A2	چای شکسته ممتاز Flowery Broken Orange Pekoe	FBOP
A3	چای شکسته Broken Orange Pekoe	BOP
A4	چای باروتی ممتاز Broken Orange Pekoe Fannings	BOPF
A5	چای خاکه Dust	D

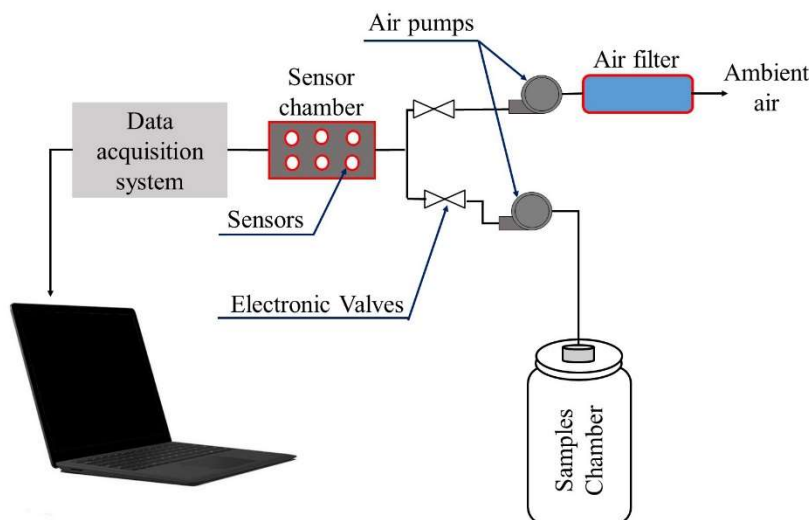
جدول (۲) آرایه حسگرهای گازی بینی الکترونیک.

Table 2 Gas sensor array of the e-nose.

نام حسگر Sensor name	کاربردهای اصلی Main applications
MQ 2	LPG, Methane, Butane, Propane, Alcohol
MQ 3	Alcohol
MQ 4	Methane
MQ 5	LPG, LNG, Natural Gas, Butane, Propane
MQ 6	LPG, LNG, Iso-Butane, Propane
MQ 7	Carbon Monoxide
MQ 8	Hydrogen
MQ 9	LPG, Carbon Monoxide, Methane
MQ 135	NH ₃ , Benzene, Alcohol
TGS 813	Methane, Butane, Propane

فراگرفته و غلظت مواد فرار در داخل محفظه به میزان مناسب برای داده‌برداری برسد. پس از گذشت این زمان، مراحل کاری بینی الکترونیک انجام شد. در مرحله اول کار بینی الکترونیک یعنی مرحله تصحیح خط مبنا، به منظور پاکسازی محفظه حسگرها و رسیدن پاسخ حسگرها به خط مبنا، هوای عبوری از فیلتر بوگیر و نم‌گیر توسط پمپ به مدت ۱۲۰ s به محفظه حسگرها تزریق شد. پس از این مرحله، تزریق گاز فضای بالای نمونه‌های چای به محفظه قرارگیری حسگرها به مدت ۶۰ s انجام شد. در این مرحله ولتاژ خروجی هر حسگر بسته به نوع و میزان

داده‌ها و تشخیص الگو، بود. هم‌چنین از حسگر دما و رطوبت AM-2302، ساخت شرکت Aosong کشور چین به منظور پایش دما و رطوبت درحین آزمایش‌ها استفاده شد. شکل (۱) اجزای سامانه بینی الکترونیک را نمایش می‌دهد. هم‌چنین به منظور کنترل فرایندها از یک واسط کاربری گرافیکی (GUI) استفاده شد که در نرم‌افزار LABVIEW نسخه ۲۰۱۸ طراحی شد. شیوه انجام آزمایشات به این صورت بود که در ابتدا نمونه‌های چای به مدت ۱۸۰۰ s در داخل محفظه نمونه محبوس شدند تا مواد فرار ساطع شده از نمونه‌ها تمام فضای داخل محفظه را



شکل (۱) نمودار شماتیک سامانه بینی الکترونیک
 Fig. 1 Schematic diagram of electronic nose system

مرحله تزریق گاز فضای بالای نمونه‌های چای در محفظه حسگرها انتخاب شد. بنابراین برای هر آزمایش تعداد ۱۰ مقدار متناظر با ده حسگر گازی استخراج شد. آخرین مرحله از پیش-پردازش داده‌ها قبل از استفاده از آن‌ها توسط روش‌های تشخیص الگو، نرمال کردن داده‌ها بود که در این مرحله داده‌ها بین +۱ و صفر نرمال سازی شدند. از رابطه (۱) به منظور نرمال سازی داده‌ها استفاده شد [۲۳].

$$x_n = \frac{(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (1)$$

که در آن، x_i داده انتخاب شده از حسگر i ام (پس از فشرده‌سازی)، x_{\max} و x_{\min} به ترتیب نماینده بیشینه و کمینه مقادیر داده‌ها، و x_n داده نرمال شده است.

بعد از پیش‌پردازش، از اطلاعات بینی الکترونیک به منظور طبقه‌بندی نمونه‌های چای با به کارگیری روش‌های کمومتریک^۱ استفاده شد [۲۴]. تحلیل مولفه اصلی (PCA)، تحلیل تفکیک خطی (LDA)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و نیز شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۲ (MLP) که یک شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار خطا^۳ (BPANN) است، از جمله این روش‌ها بودند. توضیحات کامل در مورد اصول و نحوه عملکرد این روش‌ها در مقالات مختلف ارائه شده‌اند [۲۵-۲۷]. برای ارزیابی طبقه‌بندی

حساسیت آن، تغییر می‌کند. این مدت زمان برای رسیدن سیگنال‌های خروجی حسگرها به حالت پایدار کافی بود. در مرحله آخر، به منظور پاکسازی اثر رایحه از روی حسگرها، دوباره هوای عبوری از فیلتر به مدت ۱۲۰ s به محفظه حسگرها تزریق شد تا اثری از بو باقی نمانده باشد و بدین ترتیب حسگرها تمیز شوند. مدت زمان‌های ذکر شده با انجام آزمایش‌های تجربی و بر اساس پاسخ سیگنال‌ها تعیین شدند. به‌طور کلی زمان‌بندی مراحل کار سامانه بینی الکترونیک برای کاربردهای مختلف، متفاوت است و بایستی با تغییر کاربری سامانه بینی الکترونیک، این مراحل زمان‌بندی دوباره تعیین شوند.

۲.۲. آنالیز داده‌ها و تشخیص الگو

اولین مرحله از پیش‌پردازش و استخراج ویژگی، تصحیح خط مبنا بود. به این منظور از روش کسری که به‌طور معمول برای حسگرهای MOS به کار می‌رود، استفاده شد [۱۱]. در این روش، مقدار مبنا از پاسخ حسگرها کم شده و نتیجه بر مقدار مبنا تقسیم می‌شود. مقدار مبنا نیز با میانگین گرفتن از پاسخ حسگرها در ۱۰ s قبل از شروع مرحله تزریق گاز فضای بالای نمونه‌های چای تعیین شد. مرحله دوم از پیش‌پردازش، فشرده سازی پاسخ حسگرها در هر نمونه‌گیری بود، در این مرحله، پاسخ گذرای حسگرها با استفاده از یک توصیف‌کننده فشرده می‌شود که در این پژوهش، این توصیف‌کننده ماکزیمم پاسخ حسگرها در

1. Chemometric methods
 2. Multilayer perceptron
 3. Back propagation artificial neural networks

از اعتبارسنجی متقابل ۱۰ برابری^۱ استفاده شد [۲۸].

۳. نتایج و بحث

در شکل (۲)، نمودار نمره‌دهی مؤلفه‌های اصلی در روش PCA را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های اصلی اول و دوم (PC1 و PC2) دلالت بر بیشینه مقدار واریانس در داده‌های اصلی را دارند (در این پژوهش: ۷۵٪). نمودار نمره‌دهی به منظور تعیین وجود خوشه‌های مجزای داده‌ها برای تشخیص الگو به کار می‌رود [۲۹]. نمودار شکل (a) ۲ نشان می‌دهد مؤلفه‌های PC1 و PC2 برای طبقه‌بندی گروه‌های A1، A2، A4 و A5 مناسب می‌باشند. اما گروه A3 در این نمودار، بسیار پراکنده می‌باشد. نمودار شکل (b) ۲ نشان می‌دهد که PC3 می‌تواند به جداسازی گروه A3 کمک کند. هرچند به‌طور کلی پراکندگی داده‌های گروه A3، دقت طبقه‌بندی را در روش‌های مختلف طبقه‌بندی، کاهش خواهد داد.

نمودار بارگیری^۲ مؤلفه‌های اصلی PCA در شکل (۳) نشان داده شده است. این نمودار نقش نسبی حسگرهای بینی الکترونیک در تشخیص و تمایز بین نمونه‌های چای را نشان می‌دهد. هرچقدر مقدار بارگیری هر حسگر به سمت بیرون دایره بزرگ‌تر باشد، تاثیر آن حسگر در جداسازی نمونه‌ها بیش‌تر است. به‌عنوان مثال، در شکل (۳)، حسگر MQ7 بیش‌ترین تاثیر را در جداسازی نمونه‌های چای دارد. در حالی که حسگر TGS813 و MQ135 کم‌ترین تاثیر را دارند و حذف این حسگرها تاثیر منفی قابل ملاحظه‌ای را بر دقت تشخیص و جداسازی نمونه‌های چای نخواهد داشت.

سامانه بینی الکترونیک و تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور طبقه‌بندی سه گروه از چای سیاه متداول در کشور مالزی مورد ارزیابی قرار گرفت که مشابه با این پژوهش، حسگر MQ7 بیش‌ترین تاثیر را در جداسازی گروه‌های چای داشت. در حالی که برخلاف نتایج این پژوهش حسگر TGS813 در طبقه‌بندی گروه‌های چای سیاه مؤثر بوده است [۳۰].

اطلاع از مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین متغیرها از آن‌جایی مهم است که می‌توان با انتخاب پراثرترین متغیرها (حسگرها) و حذف متغیرهای اضافی از پیچیدگی دستگاه و محاسبات کاست و نیز

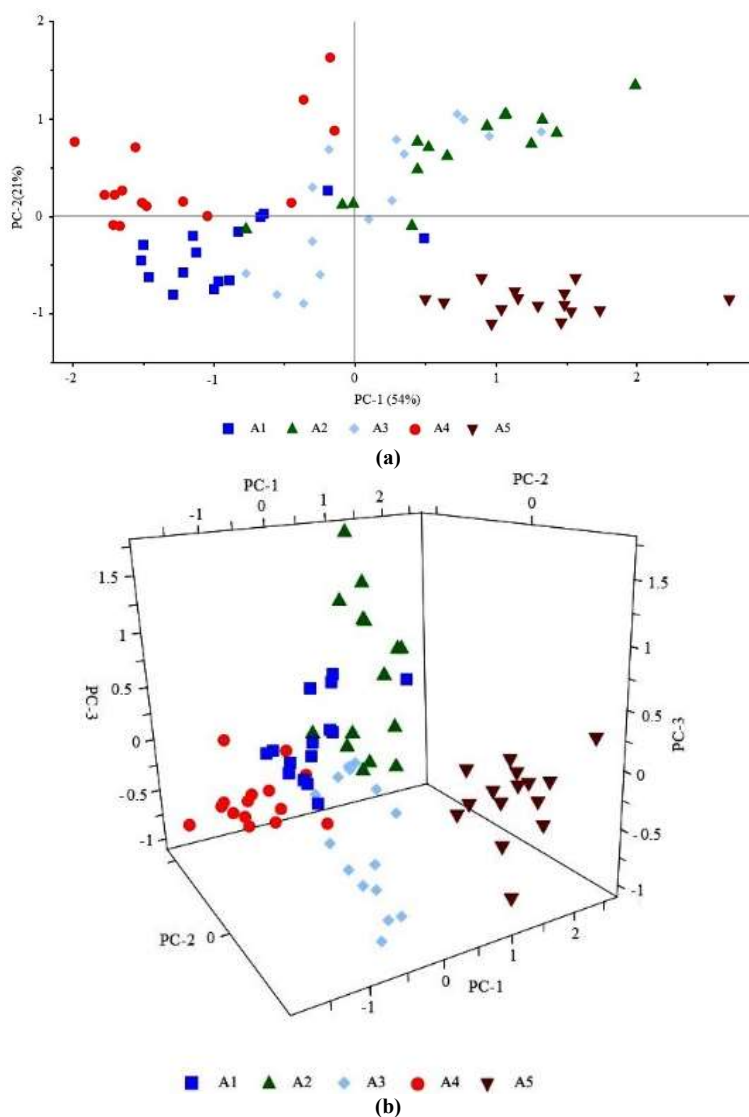
از بیش‌برازش^۱ شدن در مرحله آنالیز جلوگیری کرد و هزینه ساخت دستگاه را نیز کاهش داد [۱۰، ۳۱].

شکل (۴) نتایج بررسی توانایی روش LDA در طبقه‌بندی پنج گروه مختلف چای سیاه بر اساس داده‌های آرایه حسگرهای گازی را نشان می‌دهد. نمودار کلاس‌های مختلف چای بر اساس دو مؤلفه اصلی LDA در یک نمودار نمره‌ای^۲ ارائه شده است. دو مؤلفه اصلی در نمودار نمره‌ای بیش‌ترین تاثیر در واریانس در داده‌های اصلی را دارند. این دو مؤلفه اصلی در روش LDA در حدود ۸۰٪ واریانس را در بر می‌گیرند. ارزیابی روش LDA با استفاده از روش "یکی بیرون نگه‌دار"^۳ انجام شد و دقت طبقه‌بندی‌ای معادل با ۷۸٪ به‌دست آمد. ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی LDA در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج طبقه‌بندی LDA، بیش‌ترین شباهت در بین گروه‌های چای در گروه‌های دوم و سوم، یعنی چای شکسته ممتاز و چای شکسته به علت این‌که عموماً جداسازی چای شکسته ممتاز از چای شکسته بر اساس خصوصیت ظاهری اندازه انجام می‌شود، مشاهده شد. هم‌چنین با توجه به جدول فوق می‌توان گفت که براساس خصوصیات عطری استخراج شده از سامانه بینی الکترونیک، چای خاکه به‌طور کامل از سایر گروه‌ها قابل جداسازی بود.

در پژوهشی دقت سامانه بینی الکترونیک و آنالیز تشخیصی برای جداسازی نمونه‌های چای سیاه مطابق نظر ارزیاب‌های متخصص، ۸۴/۹۹٪ گزارش شده است [۲۰]. هم‌چنین، دقت طبقه‌بندی LDA در تشخیص قلب گلاب، ۹۴٪ گزارش شد [۳۲]. در بخش دیگری از پژوهش، از ماشین بردار پشتیبان برای جداسازی پنج درجه کیفی مختلف چای بر اساس داده‌های بینی الکترونیک استفاده شد که با دقت طبقه‌بندی کلی برابر با ۸۶/۶۷٪، عملکرد بهتری را نسبت به روش LDA نشان داد. جزئیات نتایج طبقه‌بندی SVM در جدول (۴) ارائه شده‌اند. ساختارهای مختلف در روش SVM مورد بررسی قرار گرفته که در نهایت با استفاده از تابع هسته RBF با مقادیر بهینه پارامترهای C و γ به ترتیب ۱۰۰ و ۰/۱ بهترین عملکرد حاصل شد. در این روش نیز بیش‌ترین شباهت در بین چای شکسته ممتاز و چای شکسته مشاهده شد. برتری SVM با تابع هسته RBF نسبت به روش LDA و نیز SVM با تابع هسته خطی

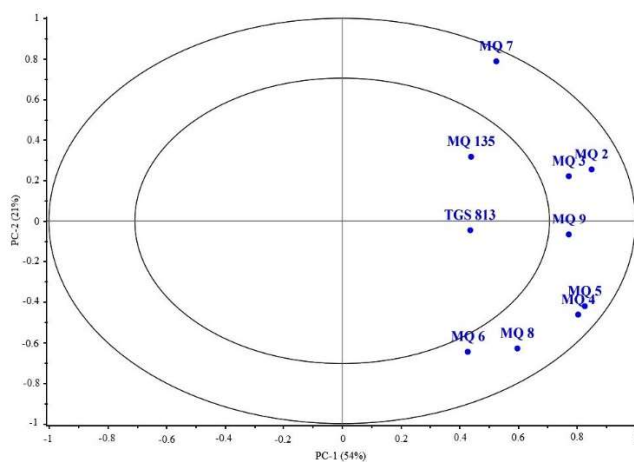
1. Over fitting
1. Score graph
3. Leave one out

1. 10-fold cross validation
2. Loading diagram



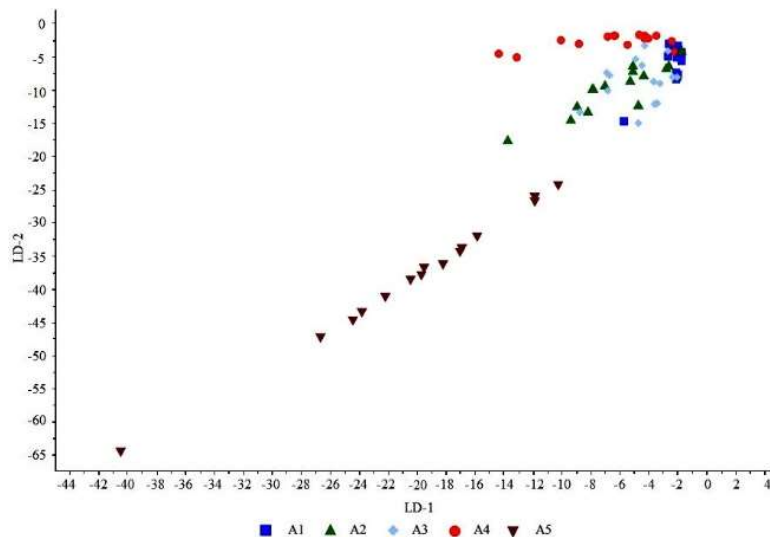
شکل (۲) نمودار نمراهی PCA؛ (a) با استفاده از مؤلفه‌های PC1 و PC2، (b) با استفاده از مؤلفه‌های PC1، PC2 و PC3

Fig. 2 Score plot of PCA; a) using PC1 and PC2 components, b) using PC1, PC2 and PC3 components



شکل (۳) نمودار بارگیری PCA

Fig. 3 Loading plot of PCA



شکل (۴) نمودار نمره‌ای LDA

Fig. 4 Score plot of LDA

جدول (۳) ماتریس اغتشاش حاصل از LDA در طبقه‌بندی پنج گروه چای سیاه (داده‌ها به درصد).

Table 3 Confusion matrix of the LAD for classification of five tea categories (data in percent).

گروه چای Tea Category	A1	A2	A3	A4	A5
A1	80.00	0.00	6.66	13.33	0.00
A2	6.67	73.33	20.00	0.00	0.00
A3	10.00	40.00	50.00	0.00	0.00
A4	13.33	0.00	0.00	86.67	0.00
A5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

بینی الکترونیک گزارش شد [۷].

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۳ تا ۵، شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر طبقه‌بندها بهترین عملکرد را برای طبقه‌بندی کیفی چای سیاه ایرانی بر اساس خصوصیات استخراجی از سامانه بینی الکترونیک داشت. همچنین بر اساس نتایج یک پژوهش که به منظور برای طبقه‌بندی عسل با استفاده از داده‌های سامانه بینی الکترونیک انجام شد، دقت شبکه عصبی مصنوعی (۰.۸۸/۵) بیش‌تر از روش آنالیز تشخیصی خطی (۰.۸۷/۳) بود [۳۶]. دقت شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص دو نوع تقلب در زعفران بر اساس بینی الکترونیک، ۸۶/۸۷ و ۱۰۰٪ گزارش شد [۳۱].

با توجه به نتایج این پژوهش، مشاهده شد که کم‌ترین میزان خطای طبقه‌بندی به میزان ۰.۱۲٪، توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که به منظور گسترش سامانه بینی الکترونیک به‌عنوان یک دستگاه برای

نشان‌دهنده توانایی بیش‌تر روش‌های غیرخطی نسبت به روش‌های خطی در طبقه‌بندی چای است. دقت طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان در تشخیص تقلب زیره کوهی بر اساس داده‌های بینی الکترونیک، برابر با ۹۷/۵٪ گزارش شد [۳۳]. در پژوهش‌های دیگری نیز کاربرد ماشین بردار پشتیبان در سامانه‌های بینی الکترونیک مناسب ارزیابی شده است [۳۴، ۳۵].

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه برای طبقه‌بندی چای منجر به جداسازی کیفی نمونه‌ها با دقتی معادل با ۰.۸۸٪ شد. ماتریس اغتشاش حاصل از این طبقه‌بند در جدول (۵) نشان داده شده است. بعد از بررسی شبکه‌های عصبی با توپولوژی‌های مختلف، بهترین مدل دارای یک لایه ورودی با ده متغیر ورودی، یک لایه مخفی با ۱۶ نرون و یک لایه خروجی با پنج متغیر خروجی بود. این دقت معادل است با آنچه توسط یو و همکاران برای طبقه‌بندی چای سبز با استفاده از طبقه‌بندی شبکه‌های عصبی مصنوعی پس انتشار خطا بر اساس خصوصیات

جدول (۴) ماتریس اغتشاش حاصل از SVM در طبقه‌بندی پنج گروه چای سیاه (داده‌ها به درصد).

Table 4 Confusion matrix of the SVM for classification of five tea categories (data in percent).

گروه چای Tea Category	A1	A2	A3	A4	A5
A1	86.67	0.00	6.67	6.67	0.00
A2	6.67	80.00	13.33	0.00	0.00
A3	6.67	20.00	73.33	0.00	0.00
A4	0.00	6.67	0.00	93.33	0.00
A5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

جدول (۵) ماتریس اغتشاش حاصل از ANN در طبقه‌بندی پنج گروه چای سیاه (داده‌ها به درصد).

Table 5 Confusion matrix of the ANN for classification of five tea categories (data in percent).

گروه چای Tea Category	A1	A2	A3	A4	A5
A1	86.67	0.00	6.67	6.67	0.00
A2	0.00	80.00	13.33	0.00	0.00
A3	0.00	13.33	80.00	6.67	0.00
A4	0.00	6.67	0.00	93.33	0.00
A5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

پایش کیفی چای و هم‌چنین با در نظر گرفتن هزینه مناسب ساخت سامانه بینی الکترونیک، در صورت یافتن راه‌هایی در جهت بهبود عملکرد این سامانه، می‌توان از آن در کارخانجات چای‌سازی به منظور ارزیابی و درجه بندی کیفی چای‌های تولید شده استفاده نمود.

طبقه‌بندی چای به صورت تجاری، بایستی روش‌های افزایش دقت طبقه‌بندی مورد بررسی قرار گیرد. به‌عنوان مثال، ترکیب روش‌های بینی الکترونیک و چشایی الکترونیک. روی و همکاران گزارش کردند که ترکیب روش‌های بینی الکترونیک و چشایی الکترونیک باعث افزایش دقت طبقه‌بندی کیفی چای نسبت به حالت مجزای می‌شود [۵، ۳۷]. هرچند که ترکیب این روش‌ها باعث افزایش هزینه ساخت سامانه خواهد شد. بنابراین جستجوی روش‌هایی برای افزایش دقت مانند کاربرد حسگرهای جدید و یا اصلاح اجزای دیگر سامانه بینی الکترونیک همچنان مورد توجه خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از یک سامانه بینی الکترونیک به منظور درجه‌بندی پنج گروه کیفی مختلف چای ایرانی استفاده شد. استفاده از روش‌های کمومتریک برای طبقه‌بندی کیفی چای بر اساس اطلاعات خروجی حسگرهای گازی نشان داد که طبقه‌بندی‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به ترتیب با دقت‌های طبقه‌بندی ۸۸ و ۸۶/۶۷٪، عملکرد مناسبی را در جداسازی پنج گروه چای سیاه ایرانی داشتند. به‌طور کلی با توجه به نیاز کارخانجات چای‌سازی به‌دستگاهی با دقت مناسب برای

منابع

- evaluation of fresh-cut pineapple by using an electronic nose. *Postharvest Biol. Technol.*, 56(3), 239-245.
- [12] Zhang, H., Wang, J., Ye, S., Chang, M. (2012). Application of electronic nose and statistical analysis to predict quality indices of peach. *Food Bioprocess Technol.*, 5(1), 65-72.
- [13] Song, S., Yuan, L., Zhang, X., Hayat, K., Chen, H., Liu, F., Xiao, Z., Niu, Y. (2013). Rapid measuring and modelling flavour quality changes of oxidised chicken fat by electronic nose profiles through the partial least squares regression analysis. *Food Chem.*, 141(4), 4278-4288.
- [14] Wei, Z., Wang, J., Zhang, W. (2015). Detecting internal quality of peanuts during storage using electronic nose responses combined with physicochemical methods. *Food Chem.*, 177, 89-96.
- [15] Gancarz, M., Wawrzyniak, J., Gawrysiak-Witulska, M., Wiącek, D., Nawrocka, A., Tadla, M., Rusinek, R. (2017). Application of electronic nose with MOS sensors to prediction of rapeseed quality. *Meas.*, 103, 227-234.
- [16] Ezhilan, M., Nesakumar, N., Babu, K.J., Srinandan, C.S., Rayappan, J.B.B. (2018). An Electronic Nose for Royal Delicious Apple Quality Assessment—A Tri-layer Approach. *Food Res. Int.*, 109, 44-51.
- [17] Bhattacharyya, N., Seth, S., Tudu, B., Tamuly, P., Jana, A., Ghosh, D., Bandyopadhyay, R., Bhuyan, M. (2007). Monitoring of black tea fermentation process using electronic nose. *J. Food Eng.*, 80(4), 1146-1156.
- [18] Tripathy, A., Mohanty, A. K., Mohanty, M. N. (2012). Electronic nose for black tea quality evaluation using kernel based clustering approach. *Int. J. Image Proc.*, 6, 86-93.
- [19] Chen, Q., Liu, A., Zhao, J., Ouyang, Q. (2013). Classification of tea category using a portable electronic nose based on an odor imaging sensor array. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 84, 77-83.
- [20] Chen, Q., Zhao, J., Chen, Z., Lin, H., Zhao, D.A. (2011). Discrimination of green tea quality using the electronic nose technique and the human panel test, comparison of linear and nonlinear classification tools. *Sens. Actuators, B: Chem.*, 159(1), 294-300.
- [21] Alocilja, E. C., Marquie, S. A., Meeusen, C., Younts, S. M., Grooms, D. L. (2004). U.S. Patent No. 6,767,732. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [22] Siebert, K.J. (2001). Chemometrics in brewing—A review. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, 59(4), 147-156.
- [23] Li, S., Li, X.R., Wang, G.L., Nie, L.X., Yang, Y.J., Wu, H.Z., Wei, F., Zhang, J., Tian, J.G., Lin, R.C. (2012). Rapid discrimination of Chinese red ginseng and Korean ginseng using an electronic nose coupled with chemometrics. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 70, 605-608.
- [24] Qiu, S., Wang, J. (2017). The prediction of food additives in the fruit juice based on electronic nose with chemometrics. *Food Chem.*, 230, 208-214.
- [25] Melucci, D., Bendini, A., Tesini, F., Barbieri, S., [1] FAOstat, (2016). URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Accessed 2018.5.20.
- [۲] معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی وزارت جهاد کشاورزی، (۱۳۹۶). گزارش وضعیت صنعت چای کشور، ۲۰ ص.
- [۳] سالاری، ر. (۱۳۸۹). مقایسه ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی سه نوع چای عمده‌ی وارداتی موجود در سطح شهر مشهد در طی سال ۱۳۸۸. *مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری غذایی*، دوره ۲، شماره ۲، ص ۶۵-۷۲.
- [2] Unachukwu, U.J., Ahmed, S., Kavalier, A., Lyles, J.T., Kennelly, E.J. (2010). White and green teas (*Camellia sinensis* var. *sinensis*): variation in phenolic, methylxanthine, and antioxidant profiles. *J. Food Sci.*, 75(6).
- [3] Roy, R.B., Chattopadhyay, P., Tudu, B., Bhattacharyya, N., Bandyopadhyay, R. (2014). Artificial flavor perception of black tea using fusion of electronic nose and tongue response: A Bayesian statistical approach. *J. Food Eng.*, 142, 87-93.
- [4] Liang, Y., Lu, J., Zhang, L., Wu, S., Wu, Y. (2005). Estimation of tea quality by infusion colour difference analysis. *J. Sci. Food Agric.*, 85(2), 286-292.
- [5] Yu, H., Wang, J., Yao, C., Zhang, H., Yu, Y. (2008). Quality grade identification of green tea using E-nose by CA and ANN. *LWT Food Sci. Technol.*, 41(7), 1268-1273.
- [۶] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۸۰). چای- نام‌های بازرگانی، شماره ۵۳۶۰.
- [7] Alfatni, M.S., Shariff, A.R.M., Abdullah, M.Z., Saeed, O.M.B., Ceesay, O.M. (2011). Recent methods and techniques of external grading systems for agricultural crops quality inspection-review. *Int. J. Food Eng.*, 7(3), 1-40.
- [8] Sanaeifar, A., Mohtasebi, S. S., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ahmadi, H. (2016). Application of MOS based electronic nose for the prediction of banana quality properties. *Meas.*, 82, 105-114.
- [9] Pearce, T. C., Schiffman, S. S., Nagle, H. T., & Gardner, J. W. (Eds.). (2006). Handbook of machine olfaction: electronic nose technology. *John Wiley & Sons*, pp 592.
- [10] Sanaeifar, A., Mohtasebi, S.S., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ahmadi, H., Lozano, J. (2014). Development and application of a new low cost electronic nose for the ripeness monitoring of banana using computational techniques (PCA, LDA, SIMCA, and SVM). *Czech J. Food Sci.* 32, 538-548.
- [11] Torri, L., Sinelli, N., Limbo, S. (2010). Shelf life

- [33] Pardo, M., Sberveglieri, G. (2005). Classification of electronic nose data with support vector machines. *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 107(2), 730-737.
- [۳۴] حاجی‌نژاد، م.؛ محتسبی، س.س.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ آغباشلو، م. (۱۳۹۵). طبقه‌بندی عسل‌های با منشأ گیاهی مختلف با استفاده از یک سامانه ماشین بویایی. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، دوره ۴۷، شماره ۳، ص ۴۱۵-۴۲۳.
- [35] Banerjee, M. B., Roy, R. B., Tudu, B., Bandyopadhyay, R., Bhattacharyya, N. (2019). Black tea classification employing feature fusion of E-Nose and E-Tongue responses. *J. Food Eng.*, 244, 55-63.
- Zappi, A., Vichi, S., Conte, L., Toschi, T.G. (2016). Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics. *Food Chem.*, 204, 263-273.
- [26] Silva, L.O.L.A., Koga, M.L., Cugnasca, C.E., Costa, A.H.R. (2013). Comparative assessment of feature selection and classification techniques for visual inspection of pot plant seedlings. *Comput. Electron. Agric.*, 97, 47-55.
- [۲۷] ثنایی‌فر، ع.؛ محتسبی، س.س.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ احمدی، ح. (۱۳۹۴). طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد ماشین بویایی (بینی الکترونیکی) بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOS) به منظور پایش رسیدگی موز. *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، جلد ۵، شماره ۱، ص ۱۱۱-۱۲۱.
- [28] Lelono, D., Triyana, K., Hartati, S., Istiyanto, J. E. (2016). Classification of Indonesia black teas based on quality by using electronic nose and principal component analysis. In AIP Conf. Proc. 1755, 1, 020003. *AIP Publishing*.
- [29] Heidarbeigi, K., Mohtasebi, S.S., Foroughirad, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Rafiee, S., Rezaei, K. (2015). Detection of adulteration in saffron samples using electronic nose. *Int. J. Food Prop.*, 18(7), 1391-1401.
- [۳۰] شعبانی، پ.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ توحیدی، م.؛ ریزی، س. (۱۳۹۷). سامانه ماشین بویایی، رهیافتی موثر برای تشخیص تقلب در گلاب. *فصلنامه علمی-پژوهشی فناوری‌های نوین غذایی*، پذیرفته شده (شناسه دیجیتال: 10.22104/JIFT. 2018.2940.1712)
- [۳۱] صفری امیری، ز.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ توحیدی، م.؛ محتسبی، س.س.؛ دولتی، م. (۱۳۹۷). استفاده از سامانه ماشین بویایی به منظور تشخیص تقلب در زیره کوهی. *فصلنامه علمی-پژوهشی فناوری‌های نوین غذایی*، دوره ۵، شماره ۳، ص ۵۲۷-۵۴۱.
- [۳۲] ثنایی‌فر، ع.؛ محتسبی، س.س.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ احمدی، ح. (۱۳۹۳). ارزیابی سامانه ماشین بویایی (بینی الکترونیکی) بر پایه حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOS) در آشکارسازی تغییرات رد اثر نگهداری موز. *فصلنامه علمی-پژوهشی فناوری‌های نوین غذایی*، دوره ۱، شماره ۳، ص ۲۹-۳۸.

*Research Article***Applying electronic nose system for qualitative classification of Iranian black tea****Sayed Hossein Payman^{1,*}, Adel Bakhshipour Ziaratgahi², Alireza Sanaeifar³**

1. Associate Professor Department of Agricultural Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Agricultural Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran.
3. PhD Graduate, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran.

Abstract

Tea is one of the strategic products in north of Iran. The tea produced in tea factories have different qualities as it is affected by various factors such as weather conditions during growth, soil, harvest time, as well as processing and preparation methods. In addition to its appearance, other essential properties of tea are its chemical compounds and aromatic characteristics. Investigating new and accurate methods for tea quality assessment has a significant effect on the development of tea processing industries. In this research, an electronic nose system was used to extract the characteristics of tea aroma and applying of these features for qualitative classification of black tea. Extracted Features from a sensor array, including ten different metal oxide gas sensors (MOS) were used for classification of five qualitative categories of black tea by means of chemometric methods. Results showed that the best classification performance was obtained by Artificial Neural Network (ANN) with a total classification accuracy of 88.00%. Also, Linear Discriminant Analysis (LDA) and Support Vector Machine (SVM) resulted in accuracies of 78.00% and 86.67% respectively. Based on the results of Principle Components Analysis (PCA), it was found that MQ7 and MQ2 sensors had the highest effect on the separation of different classes of tea. Generally, the performance of electronic nose system was suitable for qualitative classification of Iranian black tea.

Keywords: Black tea, Chemometric, Electronic nose, Metal oxide sensors, Qualitative classification.

* Corresponding author: abakhshipour@guilan.ac.ir