



مقاله پژوهشی

امکان‌سنجی کاربرد حسگر رزوناتور استوانه‌ای برای تشخیص تقلب در روغن کنجد

مجتبی نادری بلداجی^{۱*}، مهشید مختاری^۲، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۱، مجتبی توحیدی^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد
۲. دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد
۳. دانش‌آموخته دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۲۴، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۱۱/۶، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۸)

چکیده

یکی از نگرانی‌های مهم در حوزه ایمنی غذایی وقوع تقلب گسترده در تولید مواد غذایی است که ضرورت توسعه ابزارهای سریع و دقیق تشخیصی برای این منظور را بیش از پیش ایجاب می‌کند. در این مطالعه یک حسگر رزوناتور استوانه‌ای که در مطالعات قبلی توسعه و برای تشخیص کیفیت برخی مواد غذایی آزمون شده بود، برای تشخیص تقلب در روغن کنجد در ترکیب با روغن‌های ذرت، کلزا و آفتابگردان مورد آزمون قرار گرفت. به منظور امکان اندازه‌گیری پاسخ دی‌الکتریک روغن در بازه فرکانسی ۱۵۰-۰ MHz یک حسگر استوانه‌ای جدید با طول استوانه ۴۰۰ mm ساخته شد. نمونه‌های آزمایشی با ترکیب روغن خالص کنجد با روغن‌های مورد اشاره در سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵٪ وزنی تهیه و هر نمونه با سه تکرار با حسگر دی‌الکتریک اندازه‌گیری شد. روش‌های آماری تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل تفکیک خطی (LDA) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای امکان تشخیص و تفکیک انواع تقلب در نمونه‌ها از داده‌های طیفی دی‌الکتریک مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی با دو مؤلفه‌ی اصلی PC1 و PC2، قابلیت تشخیص انواع تقلب و سطوح آن را با توجیه ۹۶٪ تغییرات نشان داد. به‌عنوان بهترین نتیجه، روش کلاس‌بندی LDA با دقت ۹۶/۷٪ قابلیت تشخیص و تفکیک تقلب‌های آزمون شده در روغن کنجد را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تقلب، روغن کنجد، حسگر دی‌الکتریک، کمومتریکس.

۱. مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت، تامین غذای مورد نیاز جامعه یکی از مسائل پیچیده و مهم به‌ویژه در کشورهای جهان سوم به‌شمار می‌رود. علاوه بر مشکلات کمبود مواد غذایی، معضلاتی چون تقلبات در مواد غذایی، فساد مواد غذایی، عدم رعایت اصول بهداشتی در تهیه، تبدیل و نگهداری و توزیع و مصرف این مواد موجب تهدید سلامت و امنیت غذایی جامعه شده است. تقلب در مواد غذایی می‌تواند به شکل فروش یک ماده غذایی به جای ماده غذایی دیگر، مخلوط کردن یک ماده غذایی با مواد غذایی مشابه ولی با قیمت و کیفیت پایین‌تر، عدم رعایت استانداردهای کیفی در تولید محصول، فروش و عرضه ماده غذایی فاسد، استفاده از رنگ‌ها و مواد افزودنی غیر مجاز و کم و زیاد کردن ترکیبات یک ماده غذایی باشد. اهمیت تشخیص و مبارزه با تقلب در مواد غذایی از سه جنبه بهداشتی، به دلیل تهدید سلامت جامعه، اقتصادی، به دلیل ارزش اقتصادی کمتر ماده دارای تقلب و اجتماعی، به دلیل کاهش اعتماد مصرف کننده به فرایند تولید و اشاعه تقلب در جامعه، نیاز به توجه بیشتر در اجرای استانداردهای سلامت محور غذایی و پژوهش در خصوص توسعه ابزارهای تشخیصی تقلب را ایجاب می‌نماید.

در دهه‌های اخیر با صنعتی و مدرن شدن جوامع و کاهش فعالیت جسمی روزانه انسان، توصیه‌های پزشکی برای استفاده از روغن‌های گیاهی با کلسترول پایین مانند روغن کنجد و زیتون اهمیت بیشتری یافته است. روغن کنجد حاصل فرایند روغن-گیری از دانه‌های کنجد با پوست تحت سایش و فشار می‌باشد. مقدار روغن موجود در این دانه حدود ۵۰٪ بوده که حاوی ۷۰٪ اسیدهای چرب غیر اشباع مانند لینولئیک اسید و اولئیک اسید می‌باشد [۱]. چربی‌های غیر اشباع و چربی‌های دارای پیوندهای اشباع نشده برای سلامت قلب مفید هستند و کمک می‌کنند تا کلسترول خون تحت کنترل قرار گیرد. یک چهارم فنجان روغن کنجد حاوی حدود ۶/۷۵ g چربی غیر اشباع، ۷/۸۴ g چربی دارای پیوندهای اشباع نشده و ۲/۵ g چربی اشباع شده است. روغن کنجد حاوی آنتی‌اکسیدان‌های فراوانی نظیر سزامول و سزامولین است که خاصیت ضد سرطانی دارند و به همین دلیل، این روغن یکی از سالم‌ترین روغن‌های خوراکی محسوب می‌شود. هم‌چنین کنجد منبع خوبی از ویتامین‌های E، D، B، پروتئین سالم، فیبر و مواد معدنی است. بوی ملایم و مزه مطلوب از ویژگی‌های روغن

کنجد بوده که به‌عنوان یک روغن سالاد طبیعی مورد استفاده است. مصرف این روغن در کشورهای آسیایی و ایران زیاد است و به دلیل تفاوت قیمت به‌نسبت زیاد روغن کنجد با سایر روغن‌های نباتی مانند روغن ذرت، آفتابگردان و کلزا، انگیزه‌هایی برای تقلب و اختلاط این روغن‌ها با روغن کنجد می‌تواند در بازار وجود داشته باشد.

روش‌های آزمایشگاهی و ابزاری متعددی تا کنون برای تشخیص تقلب در مایعات غذایی و روغن‌های خوراکی توسعه و آزمون شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به کروماتوگرافی گازی [۲، ۳]، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا [۴، ۵]، روش‌های طیف‌نگاری ماوراء بنفش [۶، ۷]، نزدیک فروسرخ [۸] و فروسرخ میانه و فروسرخ میانه تبدیل فوریه [۹، ۱۰]، رامان [۱۱]، رزونانس مغناطیسی هسته [۱۲] و بینی و زبان الکترونیک [۱۳، ۱۴] اشاره نمود. این روش‌ها اغلب زمان‌بر بوده و نیاز به تجهیزات گران قیمت و کاربر متخصص دارند.

از جمله روش‌های مورد توجه برای تشخیص کیفیت و تقلب مواد غذایی در دهه اخیر روش دی‌الکتریک بوده است. خواص دی‌الکتریک یا گذردهی، خواص ذاتی ماده هستند که اثر متقابل ماده با یک میدان الکتریکی خارجی را تعیین می‌کنند. ضریب دی‌الکتریک هر ماده با یک عبارت مختلط (رابطه ۱) بیان می‌شود. مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده شامل ضریب دی‌الکتریک 'ε (بخش حقیقی عبارت مختلط) و فاکتور افت "ε (بخش موهومی عبارت مختلط) می‌باشد که به ترتیب بیانگر میزان انرژی ذخیره شده در مولکول‌های ماده و انرژی تلف شده به صورت حرارت در معرض میدان الکتریکی می‌باشند. مکانیزم‌های جذب انرژی شامل همراستایی دو قطبی‌های آزاد درون ماده با میدان الکتریکی (پلاریزاسیون)، قطبیت الکترونیکی و قطبیت اتمی و اثرگذارترین مکانیزم‌های ائتلاف انرژی هدایت یونی ماده می‌باشد. خواص دی‌الکتریک مواد حاوی رطوبت مانند محصولات غذایی و کشاورزی به شدت به میزان آب موجود در ماده، فرکانس میدان الکتریکی، درجه حرارت مواد، چگالی و ترکیب و ساختار ماده بستگی دارد [۱۵].

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

مطالعات متعددی تا کنون در خصوص استفاده از روش‌های دی‌الکتریک برای تشخیص کیفیت و یا تقلب در مایعات غذایی و روغن‌های خوراکی گزارش شده است. خصوصیات دی‌الکتریک

می‌باشد. این روش یک تبدیل خطی متعامد است که داده را به دستگاه مختصات جدید می‌برد به‌صورتی که در این تبدیل بزرگ‌ترین واریانس داده‌ها به ترتیب توسط اولین و دومین مولفه-های اصلی (PC1 و PC2) توجیه می‌شود و این روند برای همه متغیرها ادامه می‌یابد [۲۰]. اگرچه به تعداد کل متغیرهای مسئله، مولفه اصلی وجود دارد ولی به‌طور معمول چند مولفه اصلی اول که بیشترین واریانس بین داده‌ها را پوشش داده، استفاده می‌شوند و صرف نظر از سایر مولفه‌ها منجر به از دست دادن حداقل اطلاعات می‌شود [۲۱].

تحلیل تفکیک خطی یک روش طبقه‌بندی خطی با ناظر است که هدف آن یافتن ترکیب خطی مجموعه ویژگی‌هایی است که کلاس‌های مختلف را به گونه‌ای که توزیع نرمال و پراکندگی یکسانی داشته باشند از یکدیگر تفکیک کند. اگرچه LDA ابتدا برای مسائل دو کلاسه استفاده می‌شد ولی برای مسائل چند کلاسه نیز توسعه داده شد [۲۲]. در این روش داده‌های مربوط به یک کلاس تا حد امکان در زیر فضای جدید ایجاد شده به هم نزدیک و داده‌های کلاس‌های مختلف از هم دور می‌باشند، بنابراین پراکندگی بین کلاس داده‌ها بیشینه و پراکندگی درون کلاسی آن‌ها کمینه می‌شود. مزیت اصلی LDA سادگی، قابلیت اطمینان و امکان ارائه مدل با دقت مناسب در مقایسه با روش‌های طبقه‌بندی پیچیده است.

روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با ناظر است که در سال ۱۹۹۵ توسط کورتس و وپنیک برای حل مسائل دو کلاسه معرفی شد اما در ادامه برای حل مسائل چند کلاسه توسعه داده شد [۲۳]. SVM از جمله روش‌های غیر احتمالی است که برای انجام طبقه‌بندی از ابر صفحه‌ها برای تعریف مرز بین کلاس‌ها استفاده می‌کند. در واقع هدف اصلی این روش، یافتن بهترین ابر صفحه‌ای است که به‌عنوان یک سطح تصمیم‌گیری، حاشیه بین دو کلاس را بیشینه کرده و داده‌های مربوط به دو کلاس را از هم تفکیک کند. SVM همراه با توابع کرنل مختلف از جمله توابع خطی، چند جمله‌ای، پایه شعاعی و سیگموئید، می‌تواند با انتقال فضای ورودی داده‌ها به فضایی با بعد بالاتر در طبقه‌بندی غیرخطی داده‌ها استفاده شود [۲۴]. در بیشتر موارد طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از دو نوع ماشین پشتیبان C-SVM و Nu-SVM انجام می‌شود. در طبقه‌بندی به روش C-SVM پارامتر C براساس اطلاع از نویز موجود در داده‌ها

روغن‌های گیاهی و اسیدهای چرب به‌عنوان تابعی از فرکانس توسط لیزه‌ی و همکاران بررسی شد [۱۶]. نتایج نشان داد که به‌طور کلی ضریب دی‌الکتریک روغن‌های گیاهی در دمای 25°C در بازه $3-3/2$ تابعی از میزان اسیدهای غیراشباع می‌باشد. هم‌چنین ضریب دی‌الکتریک اسیدهای چرب با افزایش تعداد پیوندهای دوگانه و طول زنجیره مولکولی افزایش نشان داد. کاتالدو و همکاران [۱۷] برای بررسی کیفیت برخی روغن‌های گیاهی شامل روغن زیتون، بادام زمینی، سویا، ذرت و آفتابگردان و کنترل تقلب روغن زیتون در اختلاط با روغن آفتابگردان از روش طیف‌نگاری دی‌الکتریک استفاده نمودند. اندازه‌گیری‌ها با یک حسگر دی‌الکتریک حوزه زمانی TDR انجام و طیف‌های دی‌الکتریک با تبدیل فوریه به حوزه فرکانس در محدوده یک گیگاهرتز انتقال داده شد. نتایج قابلیت تمایز خوب انواع روغن با داده‌های دی‌الکتریک را نشان داد. هم‌چنین تفاوت در اسیدیته روغن زیتون به‌عنوان یک مشخصه کیفی و هم‌چنین تقلب در روغن زیتون در اختلاط با روغن آفتابگردان به خوبی با اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک مشخص شد. در مطالعه‌ای توسط کوراچ و همکاران [۱۸] خصوصیات دی‌الکتریک (شامل ضریب دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) انواع روغن‌های گیاهی شامل آفتابگردان، زیتون، کلزا، ذرت، سویا و دانه انگور تابعی از فرکانس در بازه 20 Hz تا 2 MHz و دما در دامنه $300-343\text{ K}$ بررسی شد. در دمای 300 K ، ضریب دی‌الکتریک انواع روغن‌ها بین $3/08-3/27$ حاصل شد و ضریب دی‌الکتریک با افزایش دما به شکل خطی کاهش یافت. نتایج نشان داد که ضریب دی‌الکتریک می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور تشخیصی برای انواع روغن گیاهی مورد استفاده قرار گیرد. راشوند و همکاران [۱۹] یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای برای تشخیص تقلب در روغن زیتون در ترکیب با روغن‌های کلزا و آفتابگردان توسعه و آزمون کردند. نمونه‌ها با اختلاط روغن‌های کلزا و آفتابگردان با روغن زیتون از 5 تا 50% تهیه شد. اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک در بازه فرکانسی 40 kHz تا 20 MHz انجام شد. نتایج تحلیل تشخیص خطی (LDA) دقت 97% در تفکیک صحیح نمونه‌های تقلب را نتیجه داد.

تجزیه مولفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش آماری چند متغیره بدون ناظر روشی شناخته شده در فشرده‌سازی داده‌های خطی، کاهش ابعاد داده‌ها، استخراج ویژگی‌ها و هم‌چنین تشخیص الگو

مایع مورد ارزیابی با این حسگر به‌عنوان ماده دی‌الکتریک بین دو قطب مثبت و منفی می‌باشد که تغییرات در خصوصیات دی‌الکتریک آن تاثیر در پاسخ دامنه-فرکانس (AF) حاصل از اندازه‌گیری خواهد داشت. شکل (۱) نمونه پاسخ AF حسگر را برای آب نشان می‌دهد [۳۰]. دره‌ها حاصل تشدید ارتعاشات مولکول‌های آب تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی در فرکانس‌های مشخصی می‌باشد. این تشدیدها در عمل به شکل میرا شونده هستند که با افزایش فرکانس، دامنه (عمق) آن‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. رابطه (۲) ارتباط نظری برای محاسبه فرکانس‌های تشدید یک رزوناتور استوانه‌ای را نشان می‌دهد [۳۰]:

$$f_{res} = \frac{c(2n-1)}{4l\sqrt{\epsilon_{re}\mu_{re}}} \quad (2)$$

که f_{res} فرکانس تشدید (Hz)، c سرعت نور در خلاء ($m s^{-1}$)، n شماره توالی تشدیدها (برای مثال سه تشدید در شکل ۱)، l طول حسگر، ϵ_{re} ضریب دی‌الکتریک نسبی ماده (ϵ'/ϵ_0)، ϵ_0 ضریب دی‌الکتریک خلاء ($F m^{-1}$)، μ_{re} نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ماده الکترونها (μ'/μ_0) و μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء ($H m^{-1}$) می‌باشد. مطابق با این رابطه فرکانس تشدید حسگر با ضریب دی‌الکتریک ماده و طول حسگر به شکل معکوس ارتباط دارد. تغییر در عمق دره در فرکانس‌های تشدید ثابت بیشتر تحت تاثیر فاکتور افت ماده [۳۰].

۲.۲. سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک

شکل (۲) طرحواره‌ای از سامانه اندازه‌گیری با حسگر رزوناتور استوانه‌ای را نشان می‌دهد. این سامانه شامل دستگاه فانکشن

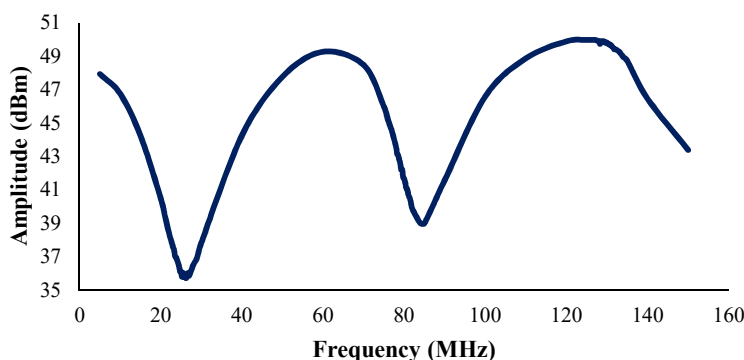
انتخاب می‌شود. پارامتر Nu در روش Nu-SVM به‌عنوان مرز بالایی از خطاها و حد پایین برای بردار پشتیبان عمل می‌کند با افزایش آن، در زمان افزایش حاشیه جداسازی کلاس‌ها، خطاها افزایش می‌یابند [۲۵، ۲۶].

خلیلیان و همکاران [۲۷] یک حسگر رزوناتور استوانه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت قند شربت چغندر قند و ارزیابی دی‌الکتریک سایر مایعات غذایی توسعه دادند. در مطالعاتی دیگر این حسگر برای تشخیص تقلب در شیر [۲۸] و تشخیص تقلب در شیره انگور [۲۱] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مجموعه مطالعات پتانسیل بسیار خوب این حسگر برای ارزیابی کیفی و تشخیص تقلب مایعات غذایی را نشان داد. هدف از مطالعه حاضر توسعه کاربرد این حسگر برای تشخیص تقلب در روغن کنجد در ترکیب با روغن‌های ذرت، کلزا و آفتابگردان می‌باشد. نوآوری این مطالعه نسبت به مطالعات گذشته در طراحی جدید حسگر رزوناتور استوانه‌ای برای تشخیص تقلب روغن کنجد در ترکیب با برخی روغن‌های گیاهی با توجه به ضریب دی‌الکتریک پایین این ماده غذایی می‌باشد. به دانش نویسندگان تا کنون مطالعه‌ای در این موضوع با استفاده از روش دی‌الکتریک گزارش نشده است.

۲. مواد و روش‌ها

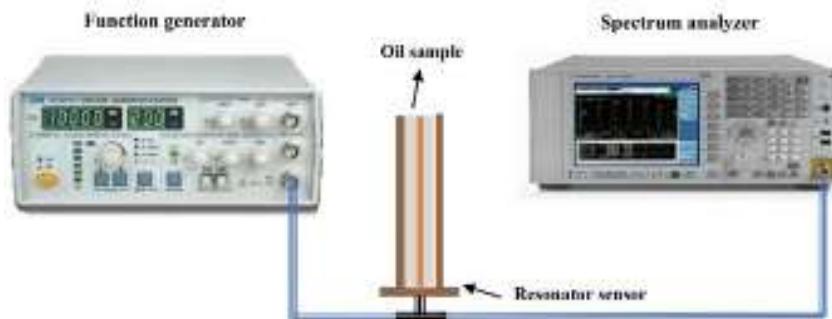
۱.۲. حسگر رزوناتور استوانه‌ای

حسگر مورد استفاده در این مطالعه متشکل از استوانه خارجی از جنس استیل به‌عنوان بدنه حسگر و قطب منفی خازن، مغزی استیل به قطر ۴ mm به‌عنوان قطب مثبت خازن و عایق‌های تفلونی برای ایزوله نمودن قطب‌های خازن می‌باشد [۲۷، ۲۹].



شکل (۱) یک نمونه پاسخ دامنه - فرکانس (AF) حسگر رزوناتور برای آب [۲۴]

Fig. 1. A sample amplitude-frequency (AF) of the resonator sensor for water



شکل (۲) سامانه اندازه گیری با حسگر رزوناتور استوانه ای
Fig. 2. Measurement system using the cylindrical resonator sensor

روغن‌های خالص نیز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک برای هر نمونه روغن با سه تکرار انجام شد. از آنجا که دستگاه فانکشن ژنراتور قادر به جاروب خودکار فرکانس فقط تا ۲۵ MHz بود، فرکانس‌ها به‌طور دستی تا ۱۵۰ MHz و با فاصله ۵ MHz جاروب شد. تنها در محدوده وقوع تشدید که با آزمایش‌های اولیه مشخص شد که در بازه ۱۱۹-۱۱۵ MHz (برای نمونه روغن‌های مختلف) می‌باشد، تغییرات فرکانس با فاصله ۰/۲۵ MHz اعمال شد تا فرکانس تشدید با دقت بیشتری ردگیری شود. با این روش، مجموعاً برای هر نمونه روغن ۴۶ فرکانس (در بازه ۰-۱۵۰ MHz) اعمال شد. تکرار اندازه‌گیری برای هر نمونه تفاوت‌های بسیار جزئی در طیف‌های دی‌الکتریک نشان داد که از این نظر می‌توان طیف‌های حاصله را به‌عنوان اثرانگشت دی‌الکتریک ماده مورد تحلیل قرار داد.

۴.۲. تحلیل‌های آماری

داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با حسگر دی‌الکتریک در حوزه فرکانس به صورت چند متغیره می‌باشند (دامنه اندازه‌گیری شده در ۴۶ فرکانس). در مجموع ۱۳ نمونه شامل ۴ نمونه روغن خالص (کنجد، کلزا، ذرت و آفتابگردان) و ۹ نمونه روغن با سطوح مختلف تقلب مورد آزمایش قرار گرفت که با در نظر گرفتن سه تکرار، ۳۹ طیف دی‌الکتریک جمع‌آوری و ذخیره شد. به منظور حذف نویز از پروفایل طیف‌های به‌دست آمده هموارسازی با استفاده از فیلتر ساویتزکی-گولای (۱۵- نقطه عرض و چند جمله‌ای مرتبه دوم) صورت گرفت. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، تجزیه و تحلیل با استفاده از روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تحلیل تفکیک خطی و ماشین بردار پشتیبان انجام شد. در این مطالعه، از دو نوع ماشین بردار پشتیبان C-SVM و Nu-SVM

ژنراتور (AG 415, OWON, Hong Kong) می‌باشد که در بازه فرکانسی ۰-۱۵۰ MHz قادر به تولید ولتاژ سینوسی می‌باشد. حسگر با استفاده از کابل هم محور و اتصال T از یک طرف به فانکشن ژنراتور و از طرف دیگر به دستگاه تحلیل‌گر طیف (مدل GPS-827 شرکت GW-instek کشور تایوان) متصل می‌شود. با جاروب فرکانس در بازه ۰-۱۵۰ MHz، تحلیل‌گر طیف دامنه توان حسگر را اندازه‌گیری می‌نماید. در نهایت طیف AF به‌عنوان یک اثر انگشت دی‌الکتریک در بازه فرکانسی مورد آزمون برای ماده حاصل می‌شود.

با توجه مقادیر ضریب دی‌الکتریک روغن‌های گیاهی که بین ۳-۳/۲ گزارش شده است [۱۶] و هم‌چنین بازه فرکانسی دستگاه فانکشن ژنراتور که محدود به ۱۵۰ MHz می‌باشد، با استفاده از رابطه (۲) با طول حسگر ۲۵۰ mm، فرکانس اولین تشدید بزرگ‌تر از ۱۵۰ MHz محاسبه شد که خارج از محدوده قابل اندازه‌گیری با دستگاه فانکشن ژنراتور می‌باشد. لذا در این مطالعه با ساخت یک حسگر جدید با طول ۴۰۰ mm فرکانس اولین تشدید حدود ۱۲۰ MHz حاصل شد. حسگر جدید بدون مجراهای ورود و خروج مایع و برای اندازه‌گیری در حال سکون مایع طراحی شد.

۳.۲. تهیه نمونه‌ها

روغن کنجد خالص حاصل روغن‌گیری کنجد با روش پرس سرد که به‌طور شهودی اصالت آن احراز شد از بازار تهیه شد. از برندهای موجود در بازار، روغن‌های کلزا، ذرت و آفتابگردان نیز تهیه شد. نمونه‌های تقلب با اختلاط روغن‌های کلزا، ذرت و آفتابگردان هر کدام با درصد‌های وزنی ۱۵، ۳۰ و ۴۵٪ با روغن کنجد تهیه شدند. هم‌چنین جهت مقایسه ضرایب دی‌الکتریک،

ضریب دی‌الکتریک نشان می‌دهند که روغن‌های گیاهی اساساً مواد دی‌الکتریک ضعیف هستند. با این حال تفاوت‌هایی اگرچه جزئی بین خصوصیات دی‌الکتریک آن‌ها به واسطه تفاوت شیمیایی در اجزاء تشکیل دهنده قابل مشاهده است. با توجه به تنوع روغن‌های گیاهی از نظر رقم، منشاء جغرافیایی و شرایط اقلیمی و همچنین روش تولید نیاز به انجام مطالعات بیشتر جهت بررسی تغییرات خصوصیات دی‌الکتریک روغن‌های گیاهی در ارتباط با ترکیب شیمیایی و اجزاء تشکیل دهنده آن می‌باشد تا بتوان نتایج جامع‌تر و قابل‌تعمیم به همه شرایط محتمل حاصل نمود.

با توجه به نتایج حاصل در خصوص ضرایب دی‌الکتریک، استفاده از تنها ضریب دی‌الکتریک به‌عنوان متغیر تشخیصی قابل‌ممکن است قدرت تشخیص و تفکیک لازم را نداشته باشد، لذا استفاده از کل متغیرهای طیف AF می‌تواند تفاوت‌های بیشتری بین نمونه‌ها ایجاد نموده و لذا قابلیت تشخیص را بهبود دهد. شکل‌های ۳b تا ۳d به ترتیب طیف‌های AF را برای نمونه‌های قلب با روغن آفتابگردان، روغن ذرت و روغن کلزا در سه سطح اختلاط را در مقایسه با روغن کنجد خالص نشان می‌دهند. با اختلاط روغن آفتابگردان و ذرت با روغن کنجد فرکانس تشدید در مقایسه با روغن کنجد خالص افزایش یافته است (یا به بیان دیگر ضریب دی‌الکتریک کاهش یافته است). در نمونه‌های قلب با روغن کلزا، برای درصدهای اختلاط مختلف هم در فرکانس تشدید و هم در عمق دره‌های تشدید تفاوت‌های واضحی قابل تشخیص می‌باشد.

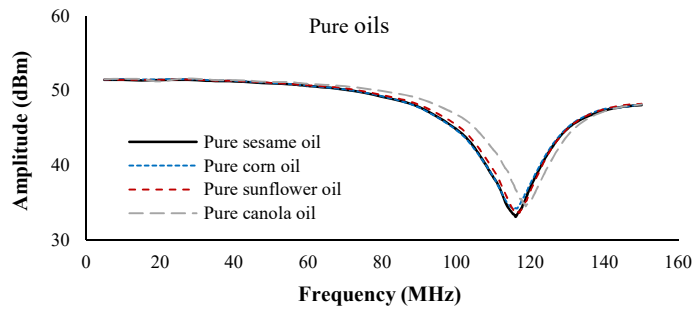
شکل (۴) نمودار اسکور برای دو مؤلفه اصلی اول برای طیف‌های AF نمونه‌های روغن خالص کنجد و نمونه‌های متقلب با روغن‌های آفتابگردان، ذرت و کلزا را نشان می‌دهد. به‌طور معمول از این نمودار در طبقه‌بندی خوشه‌های داده برای شناسایی الگوی موجود بین داده‌ها استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مؤلفه اصلی اول (۹۶٪) (PC1=۶۳٪، PC2=۳۳٪) واریانس مجموعه داده‌ها را برای تفکیک سطوح مختلف قلب توصیف کردند. این شکل قابلیت بسیار خوب تفکیک انواع قلب و سطح هر کدام را نسبت به روغن کنجد خالص با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد.

شکل (۵) نتایج تحلیل LDA در طبقه‌بندی انواع قلب و سطوح آن را نشان می‌دهد. در بیضی نشان داده شده در شکل

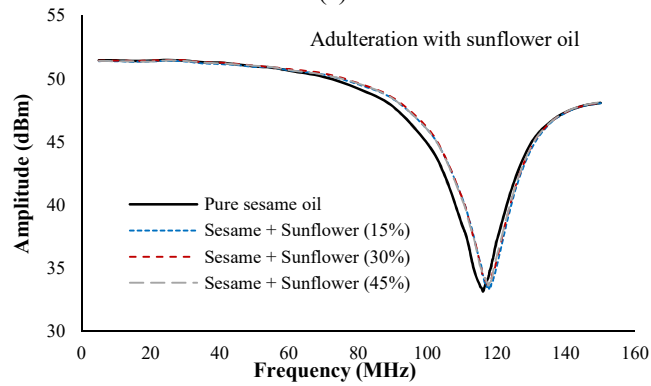
به‌منظور طبقه‌بندی روغن کنجد با سطوح مختلف قلب استفاده شد و پارامترهای مربوطه (C، Nu و γ) از طریق به حداقل رساندن خطای اعتبارسنجی و به صورت پارتیشن‌بندی شبکه‌ای به‌دست آمدند. توابع کرنل خطی، پایه شعاعی و سیگموئید برای جداسازی کلاس‌ها به کار برده شد.

۳. نتایج و بحث

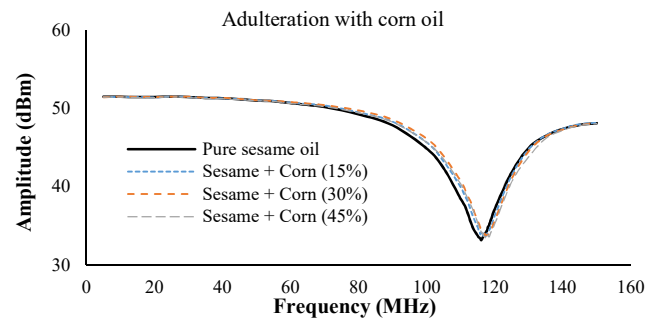
شکل (۳) طیف‌های میانگین دی‌الکتریک حاصل از اندازه‌گیری با حسگر رزوناتور استوانه‌ای برای روغن‌های خالص و روغن‌های دارای قلب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در بازه ۱۵۰-۰ MHz یک تشدید (اولین تشدید) در محدوده بین ۱۱۵-۱۲۰ MHz برای نمونه روغن‌های مختلف (خالص و متقلب) اتفاق افتاده است. با توجه به شکل ۳a این تشدید برای روغن کنجد خالص در ۱۱۶، برای روغن ذرت خالص در ۱۱۵/۷۵، برای روغن آفتابگردان خالص در ۱۱۶/۵ و برای روغن کلزای خالص در ۱۱۸/۷۵ MHz واقع شده است. با استفاده از رابطه (۲) و با فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های روغن خالص، ضرایب دی‌الکتریک نسبی روغن‌ها به ترتیب ۳/۲۲، ۳/۲۴، ۳/۲ و ۳/۰۸ محاسبه شد. در این رابطه c (سرعت نور در خلاء) 10^8 m s^{-1} ، n برابر یک، l (طول حسگر) 0.36 m ، μ_{re} (نفوذپذیری مغناطیسی نسبی استیل) برابر یک قرار داده شد [۳۰]. مقادیر حاصل شده برای ضریب دی‌الکتریک روغن‌های گیاهی به خوبی با نتایج دیگر مطالعات مطابقت دارد [۱۶، ۱۸]. روغن کلزا کوچک‌ترین و روغن ذرت بزرگ‌ترین ضرایب دی‌الکتریک را نشان دادند. لیزهی و همکاران نیز به ترتیب ضرایب دی‌الکتریک بزرگتری برای روغن ذرت و کنجد نسبت به روغن آفتابگردان و کلزا به دست آوردند [۱۶]. روغن‌های گیاهی حاوی ۹۰-۸۰٪ وزنی اسید چرب می‌باشند، لذا خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اساساً تابعی از خواص و ساختار مولکولی اسیدهای چرب موجود در آن می‌باشد. نتایج مطالعه لیزهی و همکاران نشان داد که اسیدهای چرب کاپریلیک، لینولنیک، لینولئیک، اولئیک، پالمیتیک و استئاریک به ترتیب ضرایب دی‌الکتریک بزرگتری دارند (ضرایب دی‌الکتریک از ۲/۵۳ تا ۲/۲۷). بنابراین به‌طور کلی انتظار آن می‌رود که روغن‌های از نوع لینولئیک مانند روغن ذرت و کنجد ضریب دی‌الکتریک بالاتری نسبت به روغن‌های اولئیک مانند روغن کلزا داشته باشند. این مقادیر برای



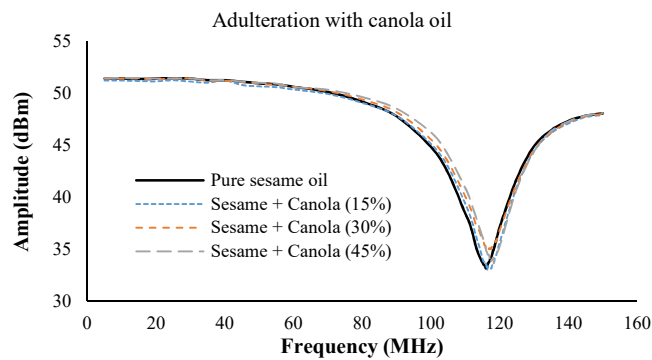
(a)



(b)



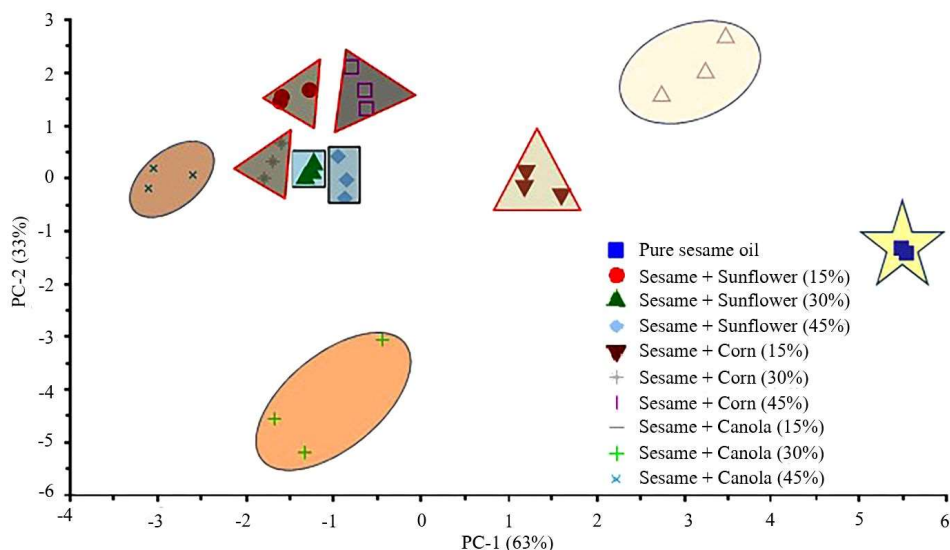
(c)



(d)

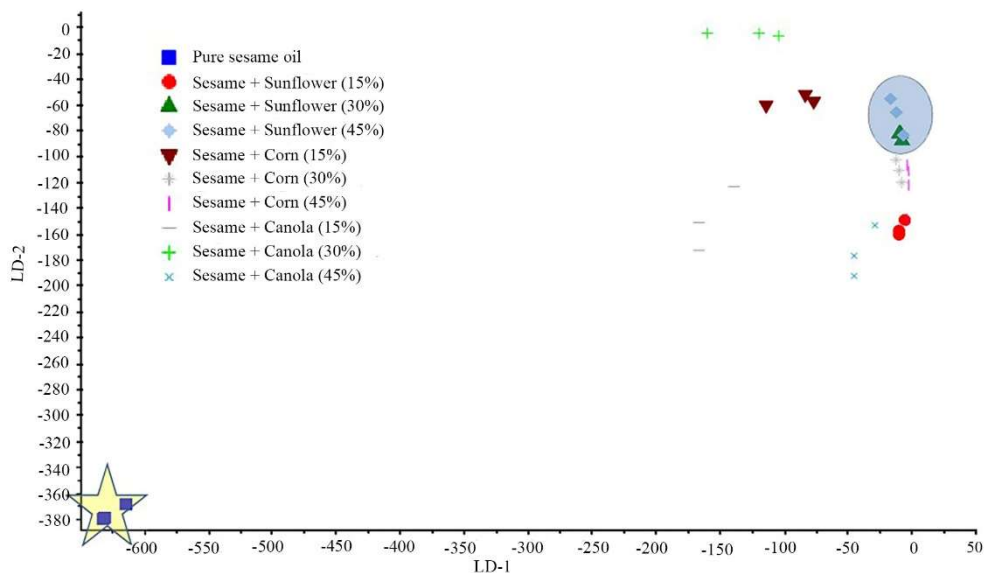
شکل (۳) طیف‌های دی‌الکتریک (a) روغن‌های خالص، (b) روغن کنجد در تقلب با روغن آفتابگردان، (c) روغن کنجد در تقلب با روغن ذرت و (d) روغن کنجد در تقلب با روغن کلزا

Fig. 3. Dielectric spectra of a) pure oils, b) sesame oil adulterated with sunflower oil, c) sesame oil adulterated with corn oil and d) sesame oil adulterated with canola oil



شکل (۴) نمودار اسکور دو مولفه اصلی تحلیل PCA. شکل‌های ستاره، بیضی، مربع و مثلث به ترتیب روغن کنجد خالص، نمونه‌های متقلب با روغن کلزا، آفتابگردان و ذرت را نشان می‌دهد. درصدهای بیشتر تقلب در هر نمونه با رنگ‌های تیره‌تر زمینه این شکل‌ها نشان داده شده است.

Fig. 4. Score plot of two principal components of PCA analysis. The star, oval, square and triangle indicated pure sesame oil, adulterated samples with canola, sunflower and corn oils, respectively. Higher percent of adulteration is shown with darker background color of the shapes.



شکل (۵) نمودار دو مولفه LD. شکل‌های ستاره و بیضی به ترتیب روغن کنجد خالص و نمونه‌های دارای همپوشانی را نشان می‌دهد.

Fig. 5. Biplot of two LD components. The star and oval show the pure sesame oil and the overlapped samples, respectively.

و سطوح آن به جز یک مورد (یک نمونه تقلب با روغن آفتابگردان در سطح ۴۵٪) صحیح تفکیک شده است. دقت نهایی این روش در طبقه‌بندی انواع تقلب و سطوح مختلف آن ۹۶/۶۷٪ حاصل شد.

جدول (۲) نتایج کلاس‌بندی نمونه‌ها با روش SVM برای سه نوع تابع کرنل را نشان می‌دهد. از این بین SVM با تابع کرنل

مشخص است که بین تقلب با روغن آفتابگردان در سطح ۳۰ و ۴۵٪ همپوشانی اتفاق افتاده ولی سایر نمونه‌های تقلب در سطوح مختلف قابل تفکیک می‌باشند. هم‌چنین نزدیکی زیادی بین نمونه‌های متقلب با روغن ذرت در دو سطح ۳۰ و ۴۵٪ وجود دارد. ماتریس هم‌اتفاقی طبقه‌بندی با روش LDA در جدول (۱) نشان داده شده است. این ماتریس نشان می‌دهد که انواع تقلب

جدول (۱) ماتریس هم اتفاقی طبقه بندی تقلب در روغن کنجد با استفاده از روش LDA.

Table 1. Confusion matrix of adulteration classification of sesame oil using LAD analysis.

Ca ₃	Ca ₂	Ca ₁	Co ₃	Co ₂	Co ₁	Sf ₃	Sf ₂	Sf ₁	PS	پیش‌بینی شده واقعی
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	PS روغن کنجد خالص Pure sesame oil
0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	Sf ₁ ۱۵٪ روغن آفتابگردان 15% sunflower oil
0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	Sf ₂ ۳۰٪ روغن آفتابگردان 30% sunflower oil
0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	Sf ₃ ۴۵٪ روغن آفتابگردان 45% sunflower oil
0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	Co ₁ ۱۵٪ روغن ذرت 15% corn oil
0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	Co ₂ ۳۰٪ روغن ذرت 30% corn oil
0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	Co ₃ ۴۵٪ روغن ذرت 45% corn oil
0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	Ca ₁ ۱۵٪ روغن کلزا 15% canola oil
0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	Ca ₂ ۳۰٪ روغن کلزا 30% canola oil
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Ca ₃ ۴۵٪ روغن کلزا 45% canola oil

جدول (۲) نتایج طبقه بندی انواع و سطوح تقلب روغن کنجد با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان.

Table 2. The results of classification of adulteration type and level in sesame oil using support vector machine.

دقت اعتبار سنجی (%) Validation accuracy (%)		دقت آموزشی (%) Training accuracy (%)		پارامترهای بهینه Optimized parameters		تابع کرنل Kernel function
Nu-SVM	C-SVM	Nu-SVM	C-SVM	Nu-SVM	C-SVM	
70	70	100	100	Nu=0.13 γ=1	C=12.9 γ=1	خطی Linear
80	83.33	96.67	86.67	Nu=0.1 γ=0.021	C=35.94 γ=0.021	تابع پایه شعاعی Base radial function
10	10	10	10	Nu=0.29 γ=0.518	C=3.16 γ=0.031	سیگموئید Sigmoid

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، کاربرد یک حسگر رزوناتور استوانه‌ای که در پژوهش‌های قبلی برای ارزیابی کیفی و تشخیص تقلب در مایعات غذایی توسعه و ارزیابی شده بود برای تشخیص تقلب در روغن کنجد در اختلاط با روغن آفتابگردان، ذرت و کلزا مورد پژوهش قرار گرفت. طیف‌های دامنه-فرکانس (AF) حاصل از اندازه-گیری‌های با این حسگر برای نمونه‌های روغن خالص و متقلب

پایه شعاعی بالاترین دقت را در هر دو روش برای طبقه‌بندی نمونه‌ها نشان داد. در روش C-SVM پارامترهای بهینه برای این تابع C (۳۵/۹۴)، γ (۰/۰۲۱) و دقت آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۸۶/۶۷ و ۸۳/۳۳ درصد و در روش Nu-SVM پارامترهای بهینه برای این تابع Nu (۰/۱)، γ (۰/۰۲۱) و دقت آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۹۶/۶۷ و ۸۰ درصد به دست آمد.

روش توانمند، کم هزینه و ساده در مقایسه با روش‌های آنالیز آزمایشگاهی برای تشخیص تقلب روغن کنجد ارائه دهد که قابلیت کاربرد به شکل پرتابل داشته باشد. هم‌چنین با توجه به تمایز خوب بین نمونه‌های روغن دارای تقلب از نمونه خالص، می‌توان دریافت که این روش پتانسیل امیدوار کننده‌ای برای توسعه یک حسگر پرتابل مجاورتی دی الکتریک برای تشخیص سریع نمونه‌های مشکوک به تقلب در محل دارد. انجام مطالعات بیشتر با تیمارهای تقلب متنوع‌تر و سطوح تقلب کوچک‌تر جهت تعمیم نتایج این پژوهش توصیه می‌گردد. هم‌چنین ترکیب حسگر دی الکتریک با دیگر حسگرها مانند طیف‌نگاری نزدیک فروسرخ می‌تواند موجب بهبود حساسیت تشخیصی این روش گردد.

تفاوت‌هایی را در ضریب دی الکتریک روغن‌های متقلب در مقایسه با روغن کنجد خالص نشان داد. نتایج نشان داد که روغن‌های خالص کنجد، آفتابگردان، ذرت و کلزا دارای ضرایب دی الکتریک در محدوده ۳/۲۴-۳/۰۸ می‌باشند که در تطابق بسیار نزدیک با مطالعات قبلی می‌باشد. این مقادیر از ضریب دی الکتریک نشان می‌دهد که روغن‌های گیاهی مواد دی الکتریک بسیار ضعیفی می‌باشند. با این حال تفاوت‌های جزئی موجود در ضرایب دی الکتریک و طیف‌های AF امکان تشخیص و تفکیک تقلب در روغن کنجد در اختلاط با دیگر روغن‌ها را بخوبی فراهم نمود. بهترین دقت در تفکیک انواع و سطوح تقلب با استفاده از روش تشخیص خطی حاصل شد. نتایج این مطالعه نشان داد که حسگر رزوناتور استوانه‌ای همراه با روش‌های کمومتریکس می‌تواند یک

منابع

- [1] فهیم دانش، م؛ بهرامی، م.ع. (۱۳۹۵) بررسی تقلب در روغن کنجد با روش آنالیز گرماسنجی افتراقی. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، جلد ۱۳، شماره ۵۵، ص ۸۱-۸۹.
- [2] Dong-Sun, L., Bong-Soo, N., Sun-Yong, B., Kun, K. (1998). Characterization of fatty acids composition in vegetable oils by gas chromatography and chemometrics. *Analytica Chimica Acta.*, 358, 163-175.
- [3] Dong-Sun, L., Eun-Sung, L., Hyun-Jung, K., Shin-Ok, K., Kun, K. (2001). Reversed phase liquid chromatographic determination of triacylglycerol composition in sesame oils and the chemometric detection of adulteration. *Analytica Chimica Acta.*, 429, 321-330.
- [4] Seo, H.Y., Ha, J., Shin, D.B., Shim, S.L., No, K.M., Kim, K.S., Lee, K.B., Han, S.B. (2010). Detection of corn oil in adulterated sesame oil by chromatography and carbon isotope analysis. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 87, 621-626.
- [5] Aued-Pimentel, S., Takemoto, E., Antoniassi, R., Badolato, E.S.G. (2006). Composition of tocopherols in sesame oil: An indicative of adulteration. *Grasas Y Aceites.*, 57, 205-210.
- [6] Ok, S. (2017). Detection of olive oil adulteration by low-field NMR relaxometry and UV-Vis spectroscopy upon mixing olive oil with various edible oils. *Grasas Y Aceites.*, 68 (1), doi: <http://dx.doi.org/10.3989/gya.0678161>
- [7] Torrecilla, J.S., Rojo, E., Domínguez, J.C., Rodríguez, F. (2010). A novel method to quantify the adulteration of extra virgin olive oil with low-grade olive oils by UV-VIS. *J. Agric. Food Chemis.*, 58 (3), 1679-1684.
- [8] Tay, A., Singh, R.K., Krishnan, S.S. Gore, J.P. (2002). Authentication of olive oil adulterated with vegetable oils using Fourier transform infrared spectroscopy. *LWT - Food Sci. Tech.*, 35(1), 99-103.
- [9] Rizki, H., Terouzi, W., Kzaiber, F., Hanine, H. Oussama, A. (2016). Quantification of adulterations in sesame oil with inferior edible oils by using ATR-FTIR coupled to chemometrics. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.*, 10(8), 138-145.
- [10] Zhao, X., Dong, D., Zheng, W., Jiao, L. Lang Y. (2014). Discrimination of adulterated sesame oil using mid-infrared spectroscopy and chemometrics. *Food Anal. Meth.*, DOI 10.1007/s12161-015-0125-7
- [11] Baeten, V. Aparicio, R. (2000). Edible oils and fats authentication by Fourier transform Raman spectroscopy. *Biotech. Agron. Soc. Environ.*, 4, 196-203.
- [12] Sega, A., Zanardi, I., Chiasserini, L., Gabrielli, A., Bocci, V. Travagli, V. (2010). Properties of sesame oil by detailed H and C NMR assignments before and after ozonation and their correlation with iodine value, peroxide value, and viscosity measurement. *Chemis. Phys. Lipids.*, 163, 148-156.
- [13] Martin, Y.G., Pavon, J.L., Perez, C., Bernardo, M., Pinto, C.G. (1999). Classification of vegetable oils by

سامانه ماشین بویایی در ترکیب با روش‌های شناسایی الگو برای تشخیص تقلب فرمالین در شیر خام. مهندسی بیوسیستم/ایران. جلد ۴۷، شماره ۴، ص ۱-۱۰.

[26] Sanaeifar, A., Mohtasebi, S., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ahmadi, H., Lozano Rogado, J.S. (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 (6), 538-548

[۲۷] خلیلیان، ح.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ نادری-بلداجی، م.؛ رستمی، س. (۱۳۹۶) توسعه و آزمون حسگر دی الکتریک استوانه ای برای اندازه گیری غلظت قند شربت چغندر قند. مهندسی بیوسیستم/ایران، جلد ۴۸، شماره ۱، ص ۱۳۷-۱۴۴.

[28] Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M. Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Comput. Electron. Agric.*, 140, 266-278.

[۲۹] خلیلیان، ح.؛ نادری بلداجی، م.؛ قاسمی ورنامخواستی،؛ رستمی، س. (۱۳۹۶) آزمون در حال جریان یک حسگر دی الکتریک استوانه ای برای اندازه گیری غلظت قند شربت چغندر قند. فصلنامه فناوری های نوین غذایی. جلد ۴، ص ۱۳۱-۱۴۰.

[30] Hoog, N. A., Olthuis, W., Mayer, M. J. J., Yntema, D., Miedema, H. van-den-Berg, A. (2012). On-line fingerprinting of fluids using coaxial stub resonator technology. *Sens. Actuators B: Chem.*, 163, 90-96.

linear discriminant analysis of electronic nose data. *Analytica Chimica Acta*, 384, 83-94.

[14] Haddi, Z., Alami, H., Bari, N.El., Tounsiet, M., Barhoumi, H., Maaref, A., Jaffrezic-Renault, N. Bouchikhi, B. (2013). Electronic nose and electronic tongue combination for improved classification of Moroccan virgin olive oil profile. *Food Res. Int.*, 54(2), 1488-1498.

[15] Skierucha, W., Wilczek, A. Szybowska, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *Int. Agrophys.*, 26, 187-197.

[16] Lizhi, H., Toyoda, K. Ihara, I. (2008). Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *J. Food Eng.*, 88, 151-158.

[17] Cataldo, A., Piuzzi, E., Cannazza, G., De Benedetto, E. Tarricone, L. (2010). Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy. *Measurement*, 43, 1031-1039.

[18] Corach, J., Sorichetti, P.A. Romano, S.D. (2014). Electrical properties of vegetable oils between 20 Hz and 2 MHz. *Int. J. Hydrogen Energy.*, 39, 8754-8758.

[19] Rashvand, M., Omid, M., Mobli, H. Soltani Firouz, M. (2016). Adulteration detection in olive oil using dielectric technique and data mining. *Sens Biosensing Res.*, 11, 33-36.

[20] Ghasemi-Varnamkhashti, M., Mohtasebi, S.S., Siadat, M., Ahmadi, H. Razavi, S.H. (2015). From simple classification methods to machine learning for the binary discrimination of beers using electronic nose data. *Eng. Agric. Environ. Food.*, 8, 44-51.

[21] Naderi-Boldaji, M., Mishra, P., Ahmadpour-Samani, M., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ghanbarian, D. Izadi, Z. (2018). Potential of two dielectric spectroscopy techniques and chemometric analyses for detection of adulteration in grape syrup. *Measurement*, 127, 518-524.

[22] Rao, R.C. (1948). The utilization of multiple measurements in problems of biological classification, *J. Roy. Statist. Soc. Series B.*, 10 (2), 159-203.

[۲۳] صفری امیری، ز.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ توحیدی، م.؛

محتسبی، س.س.؛ دولتی، م. (۱۳۹۶) استفاده از سامانه ماشین بویایی به منظور تشخیص تقلب در زیره کوهی. فصلنامه فناوری-

های نوین غذایی. پذیرش شده. DOI:

10.22104/JIFT.2017.2487.1579

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

[۲۵] توحیدی، م.؛ قاسمی ورنامخواستی، م.؛ غفاری نیا، و.؛

محتسبی، س.س.؛ بنیادیان، م. (۱۳۹۵) ساخت و توسعه یک

*Research Article***Feasibility of using a cylindrical resonator sensor for adulteration detection in sesame oil****Mojtaba Naderi-Boldaji^{1*}, Mahshid Mokhtari², Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti¹, Mojtaba Tohidi³**

1. Associate Professors, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Iran.
2. B.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Iran.
3. Ph.D., Young Researchers Club, Islamic Azad University of Shahrekord, Iran.

Abstract

One of the important concerns regarding the food safety is widespread adulteration in food production which necessitates the development of precise and rapid diagnostic instruments more than ever. In this study, a cylindrical resonator sensor, developed in previous studies and examined for quality detection of some food materials, was applied for detection of adulteration in sesame oil mixed with corn, canola and sunflower oils. To measure the dielectric response of oil in 0-150 MHz frequency range, a new sensor with 400 mm long cylinder was fabricated. Adulteration samples were prepared with mixing pure sesame oil with the above mentioned oils at 15, 30 and 45% by weight and each sample was measured with three replications using the dielectric sensor. Statistical methods of principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA) and support vector machine (SVM) were evaluated for detection of adulteration type and level from the dielectric spectral data. The biplot of the first two principal components showed excellent discrimination of adulteration type and level with 96% of variation explanation. As the best result, LDA classifier showed 96.7% accuracy for adulteration detection.

Keywords: Adulteration, Sesame oil, Dielectric sensor, Chemometrics.

* Corresponding author: naderi.mojtaba@sku.ac.ir