

تشخیص تازگی تخم‌مرغ بر اساس بُعد فراکتالی سیگنال‌های صدا

مجید لشگری^{۱*}، رضا محمدی‌گل^۲ و علی ملکی^۳

چکیده

تخم‌مرغ ماده‌ای پرمصرف است که به دلیل فسادپذیری بالا می‌تواند سلامت افراد زیادی را به مخاطره اندازد. بنابراین تشخیص تازگی آن برای صنایع غذایی اهمیت بالایی دارد. روش‌های غیرمخرب متعددی به منظور سنجش کیفیت درونی تخم‌مرغ پیشنهاد شده که در این پژوهش از سامانه صوتی برای تشخیص تازگی تخم‌مرغ استفاده شد. نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۱۶ روز نگهداری شدند. از یک سطح شیب‌دار با زاویه ۱۰ درجه به طول ۴۵ سانتی‌متر که در قسمت میانی آن پله‌ای به ارتفاع چهار میلی‌متر تعبیه شده بود در سامانه مذکور استفاده شد. صدای حاصل از غلتش نمونه‌ها و ضربه ایجاد شده در اثر عبور از پله به وسیله یک میکروفون ضبط شد. سپس بُعد فراکتال سیگنال‌های صدا با استفاده از دو روش «هیگچی» و «کاتز» محاسبه شد. آزمون مخرب نیز با در نظر گرفتن معیار واحد «هاو» انجام شد و تخم‌مرغ‌ها از نظر تازگی به دو گروه AA و A+B تقسیم شدند. نتایج سه روش طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و تحلیل تشخیصی (DA) نشان داد که روش SVM در مقایسه با دو روش دیگر از کارایی بهتری برخوردار است. میانگین دقت طبقه‌بندی داده‌های آزمایش در روش SVM برای بُعد فراکتال کاتز و طول پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه برابر ۷۸/۰۷ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ماشین بردار پشتیبان، صوتی، کاتز، طبقه‌بندی.

ارجاع: لشگری م، محمدی‌گل ر، و ملکی ع. ۱۴۰۲. تشخیص تازگی تخم‌مرغ بر اساس بُعد فراکتالی سیگنال‌های صدا. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶: ۱۳۸-۱۲۷. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14186.645>

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک.

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: m-lashgari@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

مقدمه

تخم‌مرغ یکی از مفیدترین مواد غذایی است که به وفور در آشپزی و قنادی استفاده می‌شود و مصرف آن نیز می‌تواند باعث تقویت سیستم ایمنی بدن شود. از آنجایی که فسادپذیری تخم‌مرغ زیاد است، اطمینان از سلامت آن همواره باید مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل تشخیص تخم‌مرغ سالم از ناسالم و جداسازی آن‌ها از یکدیگر همواره با اهمیت بوده است. مفهوم کیفیت تخم‌مرغ گسترده و دربرگیرنده چندین شاخص است که برخی از آنها مربوط به وضعیت ظاهری محصول و برخی دیگر نیز مربوط به وضعیت درونی آنها می‌شود. به عنوان مثال، شکستگی پوسته تخم‌مرغ‌ها یکی از عیوب ظاهری محسوب می‌شود، زیرا وجود شکستگی در پوسته باعث ورود انواع آلودگی‌ها به درون تخم‌مرغ شده و در نهایت نیز سلامت محصول را دچار خدشه می‌کند.

وضعیت درونی تخم‌مرغ‌ها که به طور مستقیم با کیفیت آنها ارتباط دارد، همانند وضعیت ظاهری آن، به سادگی قابل تشخیص نیست. بدون تردید بالاترین کیفیت درونی این محصول مربوط به لحظات اولیه تخم‌گذاری است و این کیفیت نه تنها بهبود نمی‌یابد بلکه به مرور زمان کاهش می‌یابد. به هر حال کاهش کیفیت درونی این محصول به تدریج رخ خواهد داد، اما با کنترل شرایط نگهداری از جمله دما و رطوبت می‌توان سرعت این فرآیند را کندتر نمود (Giunchi et al., 2008). شرایط نامناسب دما و رطوبت و همچنین زمان طولانی نگهداری باعث می‌شود اجزای داخلی یعنی سفیده و زرده دچار تغییر شوند. طی فرآیند سرد شدن تخم‌مرغ بلافاصله پس از تخم‌گذاری، تغییرات شیمیایی درون محصول باعث می‌شود که در فضای بین سفیده و پوسته واقع در انتهای پهن‌تر تخم‌مرغ، یک کیسه هوا تشکیل شود. به مرور رطوبت و دی‌اکسیدکربن بیشتری از روزه‌های پوسته خارج شده و هوا جایگزین آن می‌شود که در نهایت باعث افزایش ارتفاع کیسه هوا^۱ می‌شود. بنابراین کیسه هوای کوچک‌تر به معنی کیفیت بالاتر تخم‌مرغ است (Qi et al., 2020).

از سوی دیگر خروج دی‌اکسید کربن باعث می‌شود بخشی از سفیده تخم‌مرغ موسوم به سفیده ضخیم^۲ که مستقیماً

به زرده چسبیده و آن را احاطه کرده دچار تغییر شود. زمانی که تخم‌مرغ کاملاً تازه است، سفیده ضخیم به صورت زله‌ای بوده و ظاهری ابری دارد. مرور زمان باعث خواهد شد که سفیده ضخیم، نازک‌تر و رقیق‌تر شده و ظاهری شفاف‌تر پیدا کند. بنابراین نازک شدن سفیده ضخیم تخم‌مرغ یکی دیگر از نشانه‌های کاهش کیفیت آن محسوب می‌شود. روشی که برای تعیین ضخامت سفیده ضخیم تخم‌مرغ و در واقع تعیین تازگی آن به کار گرفته می‌شود، واحد «هاو»^۳ نامیده می‌شود (Raji et al., 2009).

مرور زمان باعث ایجاد تغییراتی در زرده تخم‌مرغ می‌شود. هنگامی که تخم‌مرغ تازه است زرده کاملاً برجسته و کروی شکل بوده و در مرکز سفیده قرار می‌گیرد. گذشت زمان باعث خواهد شد که زرده به صورت مسطح درآید که یکی از نشانه‌های کهنگی بیش از اندازه تخم‌مرغ، مخلوط شدن زرده و سفیده است. معمولاً از شاخص زرده^۴ برای بیان تغییرات زرده تخم‌مرغ استفاده می‌شود. البته افزایش pH سفیده و کاهش جرم حجمی نیز از دیگر نشانه‌های کهنگی تخم‌مرغ به شمار می‌آید (Qi et al., 2020).

در بین شاخص‌های بیان شده در بالا، ارتفاع کیسه هوا و جرم حجمی به صورت غیرمخرب قابل اندازه‌گیری هستند و سایر شاخص‌ها پس از شکستن نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. در صنایع به منظور تعیین تازگی این محصول معمولاً ارتفاع کیسه هوا اندازه‌گیری می‌شود. نورآزمایی^۵ روش رایج در تعیین ارتفاع کیسه هواست (Ragni et al., 2007). در این روش تک‌تک تخم‌مرغ‌ها در برابر منبع نور قوی قرار داده شده و ارتفاع مورد نظر توسط اشخاص خبره و به‌وسیله شابلون اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به تولید و مصرف بالای تخم‌مرغ در دنیا، صنایع مرتبط با این محصول به دنبال روش‌هایی هستند که به صورت برخط و با سرعت و دقت بالا قادر به تعیین کیفیت درونی آنها باشند. روش‌های غیرمخرب که از چنین ویژگی‌هایی برخوردار باشند و در حال حاضر نیز در تحقیقات مورد توجه هستند را می‌توان به چند دسته تقسیم نمود. این تقسیم‌بندی براساس تحقیقاتی که روش‌های غیرمخرب تشخیص تازگی تخم‌مرغ را مرور

3- Haugh Unit (HU)
4- Yolk Index
5- Candling

1- Air Cell Height
2- Thick Albumen

روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی بهره گرفته شد که هر دو روش دارای دقت بالایی بودند (Mehdizadeh et al., 2014).

بینی الکترونیک یکی از روش‌های غیرمخرب در تشخیص کیفیت مواد غذایی است. ارزیابی کیفیت مواد غذایی در این روش با استفاده از حسگرهای گازی حساس به ترکیبات فرار انجام می‌شود. با توجه به این که هنگام فاسد شدن تخم‌مرغ، گازهایی مانند اکسیدهای آمونیاک، آلکان‌ها و الکل‌ها ساطع می‌شوند بنابراین از این روش نیز می‌توان به منظور تشخیص تازگی تخم‌مرغ بهره گرفت (Qi et al., 2020). تحقیقاتی نیز اخیراً در خصوص استفاده از روش بینی الکترونیک در تشخیص تازگی تخم‌مرغ انجام گرفته است (Yimenu et al., 2017; Li et al., 2017).

در تحقیقی از بینی الکترونیک به منظور تشخیص تازگی تخم‌مرغ استفاده شد که نتایج آن نشان داد دقت شبکه عصبی احتمالی^۸ برای طبقه‌بندی تخم‌مرغ براساس روزهای نگهداری ۹۲/۸۶ درصد است (Li et al., 2017). استفاده از خواص دی‌الکتریک به منظور سنجش کیفیت مواد غذایی دارای سابقه طولانی نیست و بیشتر تحقیقات در این زمینه طی دو دهه اخیر انجام شده‌اند (El Khaled et al., 2015). میزان رطوبت را می‌توان عامل اصلی تأثیرگذار بر خواص دی‌الکتریک مواد برشمرده (El Khaled et al., 2015). تخم‌مرغ از آب (۷۵٪)، پروتئین (۱۲٪)، چربی (۱۲٪) و کربوهیدرات و مواد معدنی (۱٪) تشکیل شده است (Abeyrathne et al., 2013). بنابراین زوال اجزای تخم‌مرغ، خواص دی‌الکتریک آنها را تغییر می‌دهد (Qi et al., 2020). به همین دلیل تشخیص تازگی تخم‌مرغ با استفاده از خواص دی‌الکتریک یکی دیگر از روش‌هایی است که در تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است (Sun et al., 2016; Soltani et al., 2015).

در تحقیقی با استفاده از خواص دی‌الکتریک و به‌کارگیری تعدادی از روش‌های یادگیری ماشین، تازگی تخم‌مرغ مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق که در بازه فرکانسی ۴۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز انجام گرفت، شبکه عصبی مصنوعی، شبکه بی‌زی، درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبان مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاکی از

کرده‌اند انجام گرفته است (So et al., 2022; Qi et al., 2020; Rossi et al., 2013; Karoui et al., 2006). این روش‌ها عبارتند از: بینایی ماشین، طیف‌سنجی مرئی/مادون قرمز نزدیک^۱، بینی الکترونیک^۲ و خواص دی‌الکتریک. اگرچه تحقیقات محدودی نیز در این زمینه با استفاده از روش‌هایی همچون طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته^۳، تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۴، طیف‌سنجی فلورسانس^۵، طیف‌سنجی رامان^۶ و فراصوت انجام شده است.

بینایی ماشین در بسیاری از صنایع به ویژه در خطوط درجه‌بندی و بسته‌بندی انواع محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. در حال حاضر نیز این فناوری به صورت تجاری در تشخیص تازگی تخم‌مرغ مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا کنون نیز تحقیقات زیادی در خصوص تشخیص تازگی تخم‌مرغ با استفاده از فناوری بینایی ماشین و پردازش تصویر انجام شده است (Sun et al., 2015; Nematinia et al., 2018). اما پس از ورود تصویربرداری فراطیفی^۷ به عرصه تحقیقات طی سالیان اخیر، استفاده از آن در تشخیص تازگی تخم‌مرغ بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است (Dai et al., 2020; Yao et al., 2021).

طیف‌سنجی مرئی/مادون قرمز نزدیک به طور گسترده برای ارزیابی سریع کیفیت محصولات غذایی متنوع استفاده شده است. بررسی منابع حاکی از موفقیت این روش در ارزیابی پارامترهای کیفیت انواع محصولات غذایی است که شاید بتوان دلیل آن را سیر تکاملی این روش دانست که اولین کاربردهای آن به دهه ۱۹۵۰ میلادی برمی‌گردد (Loffredi et al., 2021). از این روش در تشخیص تازگی تخم‌مرغ نیز استفاده شده و همچنان تحقیقات در این خصوص ادامه دارد (Guo et al., 2022; Wang et al., 2021).

در تحقیقی از بازه ۴۰۰-۱۱۰۰ نانومتر طیف مرئی/مادون قرمز برای تشخیص تازگی تخم‌مرغ‌هایی که تا مدت ۲۵ روز نگهداری شده بودند استفاده شد. در این تحقیق از دو

- 1- NIR Spectroscopy
- 2- Electronic Nose
- 3- NMR Spectroscopy
- 4- MRI
- 5- Front-Face Fluorescence Spectroscopy
- 6- Raman Spectroscopy
- 7- Hyperspectral Imaging

8- Probabilistic Neural Network

آن بود که سه روش شبکه عصبی مصنوعی، شبکه بیزی و ماشین بردار پشتیبان از دقت بالاتری نسبت به روش درخت تصمیم برخوردار هستند (Soltani & Omid, 2015).

جدول ۱- مزایا و معایب روش‌های غیرمخرب (برگرفته از Qi et al., 2020)

معایب	مزایا	روش‌های غیرمخرب
تحت تأثیر رنگ پوسته تخم‌مرغ، آلودگی‌های سطحی و موقعیت تشخیص	سریع، ضد تداخل قوی، هزینه متوسط	طیف‌سنجی مرئی/مادون قرمز نزدیک
تحت تأثیر رنگ پوسته تخم‌مرغ و آلودگی‌های سطحی	سریع، ضد تداخل قوی، هزینه متوسط	بینایی ماشین
مدت زمان طولانی برای پایداری داده‌ها، کند	عدم تأثیرپذیری از رنگ پوسته تخم‌مرغ و آلودگی‌های سطحی، کم هزینه	بینی الکترونیکی
تحت تأثیر دما و رطوبت، پایداری کم	طراحی ساده، کم هزینه، سریع	خواص دی‌الکتریک

مواد و روش‌ها

انتخاب نمونه‌ها

نمونه‌های مورد نیاز از یک مرغداری صنعتی تهیه شدند. هر یک از تخم‌مرغ‌ها به صورت چشمی و نورآزمایی مورد بررسی قرار گرفته و در مجموع تعداد ۲۱۰ تخم‌مرغ با شکل طبیعی، عاری از آلودگی و فاقد شکستگی پوسته به عنوان نمونه‌های آزمایش انتخاب شدند. با استفاده از ترازوی دیجیتال، وزن نمونه‌ها ثبت شد. نمونه‌های آزمایش به هفت گروه ۳۰ عددی تقسیم شدند. نمونه‌ها در محیط با دمای ۲۱ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۷ درصد به مدت ۱، ۴، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ روز نگهداری شدند. انتخاب روزهای نگهداری تقریباً مشابه سایر تحقیقات بوده است (Ragni et al., 2010; Lin et al., 2011; Suktanarak & Teerachaichayut, 2017). برای این منظور، دو گروه ۳۰ عددی برای روز اول و برای سایر روزها نیز یک گروه ۳۰ عددی در نظر گرفته شد.

سامانه صوتی

به منظور ثبت سیگنال‌های صدا، یک سامانه صوتی مورد استفاده قرار گرفت که اجزای آن در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. برای انجام آزمایش‌ها یک سطح شیب‌دار پلاستیکی با زاویه ۱۰ درجه و به طول ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در قسمت میانی سطح شیب‌دار پله‌ای به ارتفاع ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد و سطح مذکور بر روی میز قرار داده شد. یک عدد میکروفن اندازه‌گیری در نزدیکی پله نصب گردید. با رهاسازی نمونه‌ها بر روی سطح شیب‌دار، صدای حاصل از غلتش آنها و ضربه ایجاد

در جدول ۱ به طور خلاصه مزایا و معایب پرکاربردترین روش‌های غیرمخرب در تشخیص تازگی تخم‌مرغ آورده شده است. این جدول یک تصویر کلی از روش‌های مرسوم به منظور مقایسه سریع آنها ارائه می‌نماید. برخی از ویژگی‌هایی که در این جدول اشاره شده‌اند از جمله سادگی طرح، هزینه اندک و سرعت بالا از ویژگی‌هایی به شمار می‌آیند که در هر سامانه‌ای مطلوب بوده و به طور معمول در تحقیقات از نظر دور نمی‌مانند.

روش‌های صوتی یکی دیگر از روش‌های غیرمخرب هستند که به منظور سنجش کیفیت انواع محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این روش در تشخیص شکستگی پوسته تخم‌مرغ نیز استفاده شده است و تحقیقات فراوانی در این خصوص می‌توان یافت (Kertész et al., 2021; Lashgari & Mohammadigol, 2018; Wang et al., 2016; Jin et al., 2015).

بدون تردید دستیابی به سامانه‌ای با دقت تشخیص بالا یکی از دلایلی است که پژوهشگران را به سوی انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه سوق داده است. اما دلایل دیگری نیز در دستیابی به چنین سامانه‌هایی مورد توجه پژوهشگران بوده که سادگی سامانه و قیمت تجهیزات از مهم‌ترین آنها به شمار می‌آیند (Jin et al., 2015). روش‌های صوتی غالباً به عنوان روش‌هایی ساده و ارزان شناخته می‌شوند که به راحتی در انواع خطوط درجه‌بندی قابل استفاده هستند. به همین دلیل سامانه‌های صوتی همواره مورد توجه بوده‌اند. بنابراین استفاده از سامانه صوتی در تشخیص تازگی تخم‌مرغ هدف این تحقیق بوده است.

$$HU = 100 \log \left[H - 5.76 \left(\frac{30M^{0.37} - 100}{100} \right) + 1.9 \right] \quad (1)$$

که در آن، H میانگین ضخامت سه نقطه برحسب میلی‌متر و M جرم تخم‌مرغ برحسب گرم است. در این معادله، مقدار بیشتر واحد «هاو» مترادف با تازگی بیشتر نمونه‌هاست. جرم نمونه‌ها نیز با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند.

پس از ثبت سیگنال‌های صدا، نمونه‌ها یکی‌یکی شکسته شده و واحد «هاو» آنها ثبت شد. بر این اساس، نمونه‌هایی که واحد «هاو» آنها بیشتر از ۷۲ بود، درجه AA، نمونه‌هایی که دارای واحد «هاو» ۶۰ تا ۷۲ بودند، درجه A و به نمونه‌های با واحد «هاو» کمتر از ۶۰ نیز درجه B داده شد (Zhao et al., 2010).

بُعد فراکتال

بُعد فراکتال در سال ۱۹۷۵ توسط یک ریاضیدان فرانسوی به نام مندلبرات^۲ معرفی شد و از آن زمان به بعد بسیاری از محققان از آن برای تفسیر پدیده‌های پیچیده طبیعی در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی بهره گرفتند. در واقع بُعد فراکتال روشی برای محاسبه پیچیدگی^۳ ساختاری یک شکل است. به عبارت دیگر، پیچیدگی توسط یک عدد به نام بُعد فراکتال بیان می‌شود. به منظور استخراج خصوصیات سیگنال‌های صدا نیز می‌توان از تحلیل فراکتالی بهره گرفت که مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است (De Belie et al., 2002; Li & Wei, 2006; Phothisonothai, 2010).

تا کنون روش‌های متعددی برای تعیین بُعد فراکتال معرفی شده‌اند که در میان آنها سه روش هیگوچی^۴، کاتز^۵ و پتروسین^۶ مقبولیت بیشتری داشته‌اند و در غالب تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kesić & Spasić, 2016). در این پژوهش از دو روش «هیگوچی» و «کاتز» برای محاسبه بُعد فراکتال سیگنال‌های صدا استفاده شد. در روش کاتز، بُعد فراکتال با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شود.

شده در اثر عبور از پله مذکور ضبط شد. با انجام پیش‌آزمایش مشخص گشت که ارتفاع در نظر گرفته شده برای پله آسیبی به پوسته صدفی تخم‌مرغ‌ها نرزد و باعث شکستگی آنها نمی‌شود.

به منظور ضبط صدای حاصل از غلتش نمونه‌ها از یک میکروفن متراکم‌کننده از پیش قطبی شده^۱ مدل MP201 مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از یک پیش‌تقویت‌کننده مدل MAP231 استفاده شد تا امپدانس را برای ورود به مبدل آنالوگ به دیجیتال کاهش دهد. سامانه جمع‌آوری اطلاعات مدل MC3022 نیز در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- اجزای سامانه صوتی

ارزیابی تازگی نمونه‌ها

به منظور تشخیص تازگی تخم‌مرغ، واحد «هاو» مورد استفاده قرار گرفت. بزرگ‌تر بودن واحد «هاو» به منزله تازه‌تر بودن تخم‌مرغ است و در اغلب تحقیقات از آن استفاده شده است (Lin et al., 2011; Suktanarak & Teerachaichayut, 2017). برای تعیین واحد «هاو» ابتدا هر یک از نمونه‌ها بر روی یک سطح شیشه‌ای کاملاً تراز شکسته شده و سپس ضخامت سه نقطه متفاوت از سفیده ضخیم آنها با استفاده از یک دستگاه کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. این سه نقطه باید در فاصله تقریبی ۱۰ میلی‌متر نسبت به پیرامون زرده تخم‌مرغ واقع شده باشند (Ragni et al., 2007). واحد «هاو» با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

2- Mandelbrot
3- Complexity
4- Higuchi
5- Katz
6- Petrosian

1- Pre-polarized Condenser

در منحنی $\ln(L(k))$ در مقابل $\ln(1/k)$ ، شیب خط حداقل مربعات خطی که بهترین تطبیق را با نمودار داشته باشد، HFD یا بُعد فراکتال هیگوجی است.

طبقه‌بندی

در این پژوهش از سه روش طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و تحلیل تشخیصی (DA) استفاده شد. روش‌های ANN و SVM به طور گسترده در طبقه‌بندی، درجه‌بندی و تشخیص محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Liakos et al., 2018). در برخی از تحقیقات نیز از روش DA به منظور طبقه‌بندی و تشخیص محصولات کشاورزی و از جمله تخم‌مرغ بهره گرفته شده است (Mahesh et al., 2015; Abdallah et al., 2018; Kertész et al., 2021).

در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی چند لایه پرسپترون (MLP) با روش تعلیم پس انتشار خطا^۱ استفاده شد. تابع فعالیت^۲ مورد استفاده در شبکه‌ها تابع Softmax بوده است. نرم افزار با تغییر تعداد گره‌ها در لایه پنهان، معماری‌های مختلفی از شبکه عصبی را ایجاد کرده و نهایتاً توپولوژی‌ای که منجر به بهترین نتیجه می‌شود را به‌عنوان نتیجه ارائه می‌دهد.

ماشین بردار پشتیبان که ایده اولیه آن در سال ۱۹۶۳ مطرح شد، امروزه از پرکاربردترین روش‌های داده‌کاوی محسوب می‌شود. در این روش ابرصفحه‌ای^۳ برای جداسازی داده‌ها در دو طبقه با حاشیه‌ای بزرگ ساخته می‌شود. به نزدیک‌ترین نقاط آموزشی به ابرصفحه، بردارهای پشتیبان گفته می‌شود که تنها از این نقاط برای مشخص کردن مرز بین طبقات استفاده می‌شود. از تابع‌های هسته^۴ مختلفی در این روش استفاده می‌شود که رایج‌ترین آنها کرنل تابع پایه شعاعی^۵ است که در بیشتر تحقیقات به‌کار گرفته می‌شود (Vercellis, & Felici, 2007).

روش تحلیل تشخیصی که توسط فیشر در سال ۱۹۳۶ معرفی شد یکی از طبقه‌بندی‌کننده‌های پایه و در عین حال ساده به شمار می‌آید (Tharwat, 2016). این روش با

اگر سیگنال به صورت مجموعه‌ای از نقاط پشت سرهم در نظر گرفته شود، بُعد فراکتال آن که بر پایه تخمینی از طول این منحنی‌هاست را می‌توان از معادله (۲) به‌دست آورد (Abdossalehi et al., 2013):

$$KFD = \frac{\log(L)}{\log(d)} \quad (2)$$

که L طول کلی منحنی و d قطر آن است. برای یک شکل موج، طول کلی منحنی برابر مجموع فاصله اقلیدسی بین نقاط متوالی و قطر d نیز دورترین فاصله بین نقطه شروع اولیه و هر نقطه دیگر شکل موج است. معادله (۲) باید توسط میانگین گام a که در واقع میانگین فاصله بین نقاط متوالی است تصحیح شود. در این صورت معادله (۲) به معادله (۳) که در زیر آورده شده است تبدیل می‌شود:

$$KFD = \frac{\log(L/a)}{\log(d/a)} \quad (3)$$

پس از تعریف n به عنوان تعداد گام‌ها در منحنی و قرار دادن آن در معادله (۲)، KFD یا بُعد فراکتالی کاتر به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$KFD = \frac{\log(n)}{\log(n) + \log(d/L)} \quad (4)$$

در روش هیگوجی، بُعد فراکتال طی مراحل زیر محاسبه می‌شود (Boroujeni & Maleki, 2019).

اگر $x(1), x(2), \dots, x(N)$ سری زمانی تحت بررسی باشد، سری زمانی جدید X_k^m مطابق معادله (۵) ایجاد می‌شود:

$$X_k^m : x(m), x(m+k), x(m+2k), \dots, x(m + \text{int}[\frac{N-m}{k}]k) \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, k$$

که m و k به ترتیب مقدار زمان اولیه و گام زمانی هستند. طول میانگین هر منحنی با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left[\frac{N-1}{\text{int}(\frac{N-m}{k})} \left(\sum_{i=1}^{\text{int}(\frac{N-m}{k})} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)| \right) \right] \quad (6)$$

طول میانگین کل برای تمامی سری‌های زمانی و برای همه k ها از مقدار یک تا k_{\max} با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k) \quad (7)$$

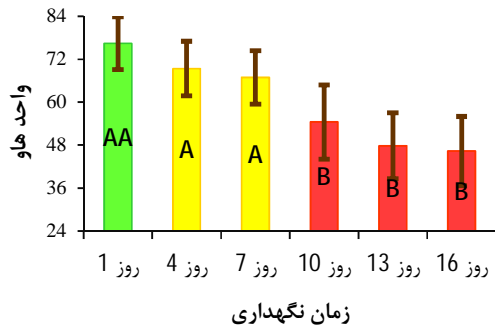
1- Backpropagation

2- Activation Function

3- Hyperplane

4- Kernel Functions

5- Radial Basis Function (RBF)



شکل ۲- نتایج آزمون مخرب

نتایج طبقه‌بندی

با توجه به نتایج آزمون مخرب، ابتدا سه گروه AA، A و B در نظر گرفته شد. نتایج طبقه‌بندی برای این سه گروه در جدول ۲ نشان داده شده است. همان گونه که از جدول ۲ مشخص است میانگین دقت طبقه‌بندی برای هر دو روش کاتر و هیگوجی مطلوب نیست. بنابراین در ادامه، نمونه‌ها به دو گروه AA و A+B تقسیم شدند.

نتایج طبقه‌بندی دو گروه تخم‌مرغ AA و A+B برای بُعد فراکتال کاتر با طول پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه در جدول ۳ آورده شده است. در جدول مذکور دقت طبقه‌بندی داده‌های آموزش و آزمایش برای هر یک از سه روش ANN، SVM و DA قابل مشاهده است که از معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$Accuracy = \frac{TN + TP}{TN + FN + TP + FP} \quad (8)$$

که TP تعداد نمونه‌های گروه AA که سامانه آنها را درست تشخیص داده، TN تعداد نمونه‌های گروه A+B که سامانه آنها را درست تشخیص داده، FP تعداد نمونه‌های گروه AA که سامانه آنها را A+B تشخیص داده، FN تعداد نمونه‌های گروه A+B که سامانه آنها را AA تشخیص داده است.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد در این تحقیق از روش زیرنمونه‌گیری تصادفی برای آموزش و آزمایش مدل‌ها بهره گرفته شد. زیرنمونه‌گیری تصادفی ۱۰ بار تکرار شد که کد پارتیشن مربوط به هر یک از آنها که توسط نرم‌افزار تولید شده در جدول ۳ آورده شده است. به منظور مقایسه دقیق‌تر روش‌های ANN، SVM و DA، در هر تکرار از یک کد پارتیشن واحد استفاده شد. به عبارت دیگر در هر تکرار، عیناً از داده‌های مشابه برای هر سه

استفاده از روش‌های آماری در پی یافتن یک ماتریس انتقال است که در آن، نسبت واریانس بین طبقه‌ها به واریانس درون طبقه‌ها بیشینه شود. به بیان دیگر پراکندگی بین طبقه‌ها حداکثر و پراکندگی درون طبقه‌ها حداقل شود. در این روش نیازی به تنظیم هیچ پارامتری وجود ندارد (Hastie et al., 2009).

در این تحقیق نرم‌افزار IBM SPSS Modeler 14 مدل‌سازی ANN و DA و نرم‌افزار Unscrambler 10.4 برای SVM مورد استفاده قرار گرفت.

۸۰ درصد داده‌ها در آموزش مدل و ۲۰ درصد داده‌ها در آزمون مدل استفاده شدند. انتخاب داده‌ها در دو بخش آموزش و آزمون مدل به صورت تصادفی توسط نرم‌افزار انجام شده است. هنگامی که داده‌ها محدود است، تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمون به صورت چندباره و به روش‌های مختلف انجام می‌شود. مدل برای هر قسمت، آموزش داده شده و آزمون می‌شود و دقت‌ها به طور میانگین محاسبه می‌شوند (Maimon & Rokach, 2010). با انجام این کار، تخمین مطمئن‌تری از خطای واقعی مدل ارائه می‌شود. یکی از روش‌های نمونه‌گیری مجدد، روش زیرنمونه‌گیری تصادفی^۱ است. در این روش، داده‌ها چندین بار به‌طور تصادفی به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شوند. در انتها میانگین دقت‌های به دست آمده از پارتیشن‌ها محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج آزمون مخرب

میانگین وزنی نمونه‌های انتخاب شده برابر $64/77 \pm 4/56$ گرم به دست آمد که در شکل ۲ نیز نتایج حاصل از آزمون مخرب به تفکیک روزهای نگهداری نشان داده شده است. مطابق نتایج، صرفاً میانگین واحد «هاو» نمونه‌های مربوط به روز ۱ با مقدار $76/44$ بالاتر از 72 است. همان گونه که از شکل ۲ مشخص است میانگین واحد «هاو» مربوط به روزهای ۴ و ۷ در محدوده $72-60$ است و میانگین واحد «هاو» مربوط به روزهای ۱۰، ۱۳ و ۱۶ نیز کمتر از 60 است. بنابراین نمونه‌های مربوط به روز ۱ درجه AA، نمونه‌های مربوط به روزهای ۴ و ۷ درجه A و سایر روزها نیز درجه B خواهند گرفت.

واقع کمترین دقت نیز مربوط به روش DA است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش SVM در مقایسه با دو روش دیگر از کارایی بهتری برخوردار است. دقت طبقه‌بندی داده‌های آزمایش در روش SVM از ۷۰/۴۵ تا ۸۵/۷۱ متغیر بوده اما میانگین آن برابر ۷۸/۰۷ به دست آمد.

روش ANN، SVM و DA استفاده شده است تا کارایی هر یک از آنها برای یک مجموعه داده واحد قابل مقایسه باشد. همان گونه که از جدول ۳ مشخص است در غالب تکرارها بالاترین دقت طبقه‌بندی داده‌های آزمایش مربوط به روش SVM و پس از آن مربوط به روش ANN است و در

جدول ۲- نتایج طبقه‌بندی سه گروه برای بُعد فراکتال کاتز و هیگوچی

بُعد فراکتال	میانگین دقت طبقه‌بندی (%)					
	DA		SVM		ANN	
	آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش
کاتز	۵۱/۱۵±۵/۹۱	۵۰/۰۲±۱/۶۰	۵۴/۵۱±۶/۲۴	۵۲/۰۵±۱/۷۱	۵۳/۷۱±۷/۱۸	۵۴/۱۰±۳/۴۹
هیگوچی	۴۸/۸۵±۸/۱۶	۴۷/۷۷±۱/۹۹	۵۰/۰۱±۸/۷۹	۴۸/۸۶±۲/۵۳	۵۰/۳۳±۱۰/۸۰	۴۹/۲۷±۲/۸۰

جدول ۳- نتایج طبقه‌بندی دو گروه (کاتز با طول پنجره ۲۵ میلی ثانیه)

تکرار	کد پارتیشن	دقت طبقه‌بندی (%)					
		DA		SVM		ANN	
		آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش
۱	۲۵۲۲۴۰۴	۶۶/۲۸	۸۰/۰۰	۷۶/۱۶	۸۰/۱۷	۷۹/۰۷	۷۹/۵۲
۲	۶۲۴۲۲۹۳	۶۹/۷۱	۷۵/۰۰	۷۹/۴۳	۷۴/۷۳	۷۹/۵۲	۷۹/۵۲
۳	۳۶۴۵۰۹۲	۷۱/۶۰	۷۳/۶۸	۸۰/۴۷	۷۳/۴۸	۷۷/۵۱	۷۷/۵۱
۴	۸۳۳۵۱۴۰	۶۹/۰۵	۷۱/۴۳	۸۰/۶۱	۷۱/۳۵	۷۵/۱۵	۷۵/۱۵
۵	۸۲۳۵۹۷۳	۶۷/۸۶	۷۹/۴۹	۷۹/۱۷	۷۱/۷۹	۷۶/۷۹	۷۶/۷۹
۶	۴۷۰۳۹۸۲	۶۸/۱۲	۸۲/۹۸	۷۷/۵۰	۸۰/۸۵	۷۷/۶۴	۷۷/۶۴
۷	۵۳۷۵۶۲۶	۶۷/۴۸	۷۰/۴۵	۸۰/۹۸	۷۰/۸۳	۸۰/۷۶	۸۰/۷۶
۸	۴۸۳۰۵۴۹	۶۳/۳۵	۷۸/۲۶	۷۶/۴۰	۸۲/۶۱	۷۸/۲۶	۷۸/۲۶
۹	۱۲۴۵۸۹۵	۶۶/۰۶	۸۵/۷۱	۷۶/۹۷	۸۰/۹۵	۷۵/۷۶	۷۵/۷۶
۱۰	۲۲۱۰۷۷۸	۶۸/۹۰	۸۳/۷۲	۷۸/۶۶	۸۱/۴۰	۷۸/۰۵	۷۸/۰۵
انحراف معیار± میانگین		۶۷/۸۵±۲/۱۵	۷۸/۰۷±۵/۳۰	۷۸/۶۴±۱/۸۰	۷۶/۸۲±۴/۵۳	۷۷/۸۵±۱/۶۱	۷۷/۸۵±۱/۶۱

روش ANN، SVM و DA بیشتر بوده و در دو طول پنجره دیگر نیز دقت بُعد فراکتال هیگوچی بالاتر بوده است. در هر دو جدول، بهترین دقت طبقه‌بندی داده‌های آزمایش مربوط به روش SVM است با این تفاوت که برخلاف بُعد فراکتال کاتز، طول پنجره بر نتایج بُعد فراکتال هیگوچی تأثیر محسوسی نداشته است. از مجموع نتایج ثبت شده در دو جدول ۴ و ۵ می‌توان دریافت که بهترین دقت طبقه‌بندی برای داده‌های آزمایش متعلق به بُعد فراکتال کاتز با پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه و روش SVM است که به همین دلیل جزئیات آن پیشتر در جدول ۳ ارائه شد.

نتایج طبقه‌بندی دو گروه تخم مرغ AA و A+B برای بُعد فراکتال کاتز و هیگوچی به ترتیب در دو جدول ۴ و ۵ آورده شده است. در بُعد فراکتال کاتز، بالاترین دقت طبقه‌بندی در هر سه روش ANN، SVM و DA مربوط به طول پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه است و با افزایش طول پنجره به ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌ثانیه کاهش یافته است. اما در بُعد فراکتال هیگوچی، بالاترین دقت طبقه‌بندی در هر سه روش ANN، SVM و DA مربوط به طول پنجره ۵۰ میلی‌ثانیه است و در طول پنجره‌های ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌ثانیه دقت کمتری ثبت شده است. مقایسه دو جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد در طول پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه، دقت طبقه‌بندی بُعد فراکتال کاتز نسبت به هیگوچی در هر سه

جدول ۴- نتایج طبقه‌بندی دو گروه برای بُعد فراکتال کاتز

میانگین دقت طبقه‌بندی (%)						طول پنجره (میلی‌ثانیه)
DA		SVM		ANN		
آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	
۶۷/۸۵±۲/۱۵	۷۸/۰۷±۵/۳۰	۷۸/۶۴±۱/۸۰	۷۶/۸۲±۴/۵۳	۷۷/۸۵±۱/۶۱	۷۰/۵۵±۶/۱۴	۲۵
۵۰/۷۳±۱/۴۶	۷۰/۷۷±۵/۰۵	۷۱/۰۴±۱/۲۳	۷۰/۴۰±۴/۲۶	۷۱/۲۱±۱/۷۹	۵۱/۷۳±۳/۷۷	۵۰
۵۲/۹۳±۰/۸۴	۶۹/۷۶±۵/۴۹	۷۱/۲۲±۱/۴۹	۷۱/۴۷±۳/۹۱	۷۰/۹۸±۱/۵۸	۵۱/۳۳±۳/۳۸	۱۰۰

جدول ۵- نتایج طبقه‌بندی دو گروه برای بُعد فراکتال هیگوچی

میانگین دقت طبقه‌بندی (%)						طول پنجره (میلی‌ثانیه)
DA		SVM		ANN		
آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش	
۶۳/۵۶±۸/۱۲	۷۵/۵۷±۶/۹۹	۷۵/۳۷±۲/۲۴	۷۱/۹۸±۷/۶۰	۷۳/۵۳±۲/۳۵	۶۳/۵۶±۸/۱۲	۲۵
۶۶/۲۳±۸/۵۰	۷۵/۸۱±۷/۲۱	۷۵/۳۷±۲/۱۵	۷۳/۰۵±۶/۸۴	۷۳/۴۴±۲/۱۶	۶۶/۲۳±۸/۵۰	۵۰
۶۳/۹۳±۷/۱۴	۷۵/۵۹±۶/۰۹	۷۵/۴۸±۲/۵۱	۷۱/۵۱±۷/۶۲	۷۲/۶۱±۲/۰۳	۶۳/۹۳±۷/۱۴	۱۰۰

گرفته شده که غالباً دقت نتایج آنها در حد قابل قبول گزارش شده است. اما آنچه که مسلم است علاوه بر دقت، معیارهای دیگری همچون پایداری، سرعت و به‌ویژه هزینه سیستم نیز در انتخاب روش‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار هستند. به عنوان مثال سرعت فرآیند طبقه‌بندی یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در انتخاب هر یک از این روش‌هاست که در حال حاضر انتظارات صنایع طیور در این خصوص برآورده نشده است (So et al., 2022). بنابراین دلیل اصلی ادامه تحقیقات در این زمینه، دستیابی به سامانه‌ای است که انتظارات صنایع مرتبط را برآورده سازد.

تجهیزات مورد نیاز در سامانه صوتی به سهولت در دسترس بوده و از نظر قیمت نیز در مقایسه با تجهیزات مورد نیاز برخی از روش‌ها، ارزان هستند. از سوی دیگر نیز آماده‌سازی شرایط داده‌برداری به سادگی امکان‌پذیر است که در سرعت فرآیند تأثیر مستقیم دارد. یکی از نکات حائز اهمیت این است که استفاده از سامانه‌های صوتی برای تشخیص شکستگی تخم‌مرغ به طور کامل تجاری شده است. در صورتی‌که بتوان از این سامانه‌ها به‌طور هم‌زمان برای تشخیص شکستگی پوسته و تازگی آنها بهره گرفت، مزیتی خواهد بود که در برخی از سامانه‌های دیگر وجود ندارد. بنابراین با استفاده از یک سامانه و یک مرحله داده‌برداری می‌توان وضعیت ظاهری و درونی نمونه‌ها را به طور هم‌زمان ارزیابی نمود.

بدون تردید دقت یکی از شاخص‌های مهم در طبقه‌بندی به شمار می‌آید و ارتقا آن کاملاً ضروری است. با توجه به این‌که تعداد نمونه‌ها در این تحقیق تا اندازه‌ای کم بودند، ممکن است با افزایش آنها، نتایج بهتری نیز حاصل شود. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است میانگین واحد «هاو» مربوط به روزهای ۴ و ۷ در محدوده ۶۰-۷۲ است اما برخی از نمونه‌های مربوط به روزهای ۴ و ۷ واحد «هاو» بیش از ۷۲ نیز داشته‌اند. بنابراین می‌توان دریافت که دو گروه AA و A+B در نظر گرفته شده در این تحقیق دارای هم‌پوشانی هستند. در صورتی‌که اختلاف بین گروه‌ها بیشتر باشد، ارتقای دقت نتایج نیز دور از انتظار نخواهد بود (Yalcin, 2017). در مطالعات مشابه، دقت طبقه‌بندی تخم‌مرغ‌ها براساس تازگی با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک و شبکه عصبی معمولی، ۷۳/۳ درصد گزارش شده است (Zhao et al., 2010). در برخی پژوهش‌های دیگر نیز اگرچه دقت طبقه‌بندی بالاتری گزارش شده اما زمان نگهداری نمونه‌های مورد استفاده در برخی از آنها طولانی بوده است. در برخی از تحقیقات زمان نگهداری تا چهار هفته (Yongwei et al., 2009) و شش هفته (Dutta et al., 2003; Zhang et al., 2015) نیز به چشم می‌خورد. بی‌شک نگهداری طولانی مدت باعث افت شدید کیفیت نمونه‌ها و به دنبال آن افزایش اختلاف بین گروه‌ها خواهد شد که ارتقای دقت طبقه‌بندی را در پی خواهد داشت.

به هر ترتیب تاکنون در تشخیص تازگی تخم‌مرغ از تجهیزات متفاوت و روش‌های طبقه‌بندی گوناگونی بهره

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد سامانه صوتی به‌عنوان روشی غیرمخرب برای تشخیص تازگی تخم‌مرغ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این سامانه برای طبقه‌بندی نمونه‌ها به سه گروه AA، A و B مناسب نیست ولی برای طبقه‌بندی نمونه‌ها به دو گروه AA و A+B از دقت قابل قبولی برخوردار است. نتایج حاکی از آن بود که دقت طبقه‌بندی متأثر از طول پنجره است. این تأثیر به ویژه در بُعد فراکتال کاتز بیشتر به چشم می‌خورد و طول پنجره در بُعد فراکتال هیگوچی تأثیر اندکی داشته است. بالاترین دقت طبقه‌بندی در بُعد فراکتال کاتز در هر سه روش ANN، SVM و DA در طول پنجره ۲۵ میلی‌ثانیه به ثبت رسید. نتایج طبقه‌بندی نشان داد که روش SVM نسبت به دو روش دیگر یعنی ANN و DA بالاترین دقت طبقه‌بندی را با میانگین ۷۸/۰۷ درصد داراست. با افزایش تعداد نمونه‌ها، استفاده از سایر روش‌های طبقه‌بندی، به کار بستن سایر روش‌های محاسبه بُعد فراکتال، می‌تواند ارتقا دقت طبقه‌بندی را انتظار داشت. به هر ترتیب ویژگی‌هایی همچون سادگی و ارزان بودن سامانه صوتی می‌تواند دلیلی برای ادامه تحقیقات در این زمینه باشد.

منابع

- Scattering Image Combined with Ensemble Learning. *Sensors*, 20(19): 5484.
- De Belie, N., Harker, F. R., & De Baerdemaeker, J. (2002). Ph—Postharvest technology: Crispness judgement of royal gala apples based on chewing sounds. *Biosystems engineering*, 81(3): 297-303.
- Dutta, R., Hines, E.L., Gardner, J.W., Udrea, D.D. & Boilot, P. (2003). Non-destructive egg freshness determination: an electronic nose based approach. *Measurement Science and Technology*, 14(2): 190-198.
- El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J. A., Garcia, R. M., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Fruit and vegetable quality assessment via dielectric sensing. *Sensors*, 15(7): 15363-15397.
- Felici, G., & Vercellis, C. (Eds.). (2007). *Mathematical methods for knowledge discovery and data mining*. IGI Global.
- Giunchi, A., Berardinelli, A., Ragni, L., Fabbri, A., & Silaghi, F. A. (2008). Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy. *Journal of food engineering*, 89(2): 142-148.
- Guo, H., Bao, Z., Zhang, S., Ran, Y., Ning, R., Li, Y., ... & He, L. (2022). A Novel NIR-Based Strategy for Rapid Freshness Assessment of Preserved Eggs. *Food Analytical Methods*, 15(5): 1457-1469.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction* (Vol. 2, pp. 1-758). New York: Springer.
- Jin, C., Xie, L., & Ying, Y. (2015). Eggshell crack detection based on the time-domain acoustic signal of rolling eggs on a step-plate. *Journal of Food Engineering*, 153: 53-62.
- Karoui, R., Kemps, B., Bamelis, F., De Ketelaere, B., Decuyper, E. & De Baerdemaeker, J. (2006). Methods to evaluate egg freshness in research and industry: A review. *European Food Research and Technology*, 222(5-6): 727-732.
- Kertész, I., & Zsom-Muha, V., András, R., Horváth, F., Németh, C., & Felföldi, J. (2021). Development of a Novel Acoustic Spectroscopy Method for Detection of Eggshell Cracks. *Molecules*, 26(15): 4693.
- Kesić S, Spasić SZ. (2016). Application of Higuchi's fractal dimension from basic to clinical neurophysiology: A review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 133: 55-70.
- Lashgari, M., & Mohammadigol, R. (2018). Comparative study of acoustic signals of rolling eggs on inclined plate and impulse
- Abeyrathne, E. N. S., Lee, H. Y., & Ahn, D. U. (2013). Egg white proteins and their potential use in food processing or as nutraceutical and pharmaceutical agents—A review. *Poultry science*, 92(12): 3292-3299.
- Abdallah, S. E., Elmessery, W. M., & Elseify, A. A. (2018). A new low-cost detection device for early discrimination of eggs fertility using advanced statistical classifiers. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 35(1): 199-226.
- Abdossalehi, M., Nasrabadi, A. M. & Firouzabadi, S.M. (2013). Investigation of Positive, Negative and Neutral Emotion's determinism through EEG signal processing in extracted component of ICA. *Iranian Journal of Biomedical Engineering*, 7(2): 143-153.
- Boroujeni F.M., & Maleki, A. (2019). Fractal Analysis of Noise Signals of Sampo and John Deere Combine Harvesters in Operational Conditions. *Archives of Acoustics*, 44(1): 89-98.
- Dai, D., Jiang, T., Lu, W., Shen, X., Xiu, R., & Zhang, J. (2020). Non-destructive Detection for Egg Freshness Based on Hyperspectral

- evaluation of shell eggs during storage using a dielectric technique. *Transactions of the ASABE*, 50(4): 1331-1340.
- Ragni, L., Cevoli, C. & Berardinelli, A. (2010). A waveguide technique for non-destructive determination of egg quality parameters. *Journal of Food Engineering*, 100: 343-348.
- Raji, A.O., Aliyu, J., Igwebuike, J.U. & Chiroma, S. (2009). Effect of storage methods and time on egg quality traits of laying hens in a hot dry climate. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 4(4): 1-7.
- Rossi, M., Nys, Y., Anton, M., Bain, M., De Ketelaere, B., De Reu, K., ... & Sirri, F. (2013). Developments in understanding and assessment of egg and egg product quality over the last century. *World's Poultry Science Journal*, 69(2): 414-429.
- So, J. H., Joe, S. Y., Hwang, S. H., Hong, S. J., & Lee, S. H. (2022). Current advances in detection of abnormal egg: a review. *Journal of Animal Science and Technology*, 64(5): 813-829.
- Soltani, M., Omid, M., & Alimardani, R. (2015). Egg quality prediction using dielectric and visual properties based on artificial neural network. *Food analytical methods*, 8(3): 710-717.
- Soltani, M., & Omid, M. (2015). Detection of poultry egg freshness by dielectric spectroscopy and machine learning techniques. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2): 1034-1042.
- Suktanarak, S. & Teerachaichayut, S. (2017). Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*, 215: 97-103.
- Sun, L., Yuan, L. M., Cai, J. R., Lin, H., & Zhao, J. W. (2015). Egg freshness on-line estimation using machine vision and dynamic weighing. *Food Analytical Methods*, 8(4): 922-928.
- Sun, J., Liu, B., Mao, H., Wu, X., Gao, H., & Yang, N. (2016). Non-destructive examination for freshness of eggs based on dielectric properties and yolk index regression model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(21): 290-295.
- Tharwat, A. (2016). Linear vs. quadratic discriminant analysis classifier: a tutorial. *International Journal of Applied Pattern Recognition*, 3(2): 145-180.
- Wang, H., Mao, J., Zhang, J., Jiang, H., & Wang, J. (2016). Acoustic feature extraction and optimization of crack detection for eggshell. *Journal of food engineering*, 171: 240-247.
- response in eggshell crack detection. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(1): 150-156.
- Li, J. P., & Wei, B. G. (2006). A study of acoustical characteristics of pine nut based on a fractal dimension method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 7(2): 357-361.
- Li, J., Zhu, S., Jiang, S., & Wang, J. (2017). Prediction of egg storage time and yolk index based on electronic nose combined with chemometric methods. *LWT-Food Science and Technology*, 82: 369-376.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8): 2674.
- Lin, H., Zhao, J., Sun, L., Chen, Q. & Zhou, F. (2011). Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12(2): 182-186.
- Loffredi, E., Grassi, S., & Alamprese, C. (2021). Spectroscopic approaches for non-destructive shell egg quality and freshness evaluation: Opportunities and challenges. *Food Control*, 129: 108255.
- Mahesh, S., Jayas, D. S., Paliwal, J., & White, N. D. G. (2015). Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *Journal of Stored Products Research*, 61: 17-26.
- Maimon, O., & Rokach, L. (2nd Eds.). (2010). Data mining and knowledge discovery handbook.
- Mehdizadeh, S. A., Minaei, S., Hancock, N. H., & Torshizi, M. A. K. (2014). An intelligent system for egg quality classification based on visible-infrared transmittance spectroscopy. *Information Processing in Agriculture*, 1(2): 105-114.
- Nematina, E., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018). Assessment of egg freshness by prediction of Haugh unit and albumen pH using an artificial neural network. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3): 1449-1459.
- Phothisonothai, M. (2010). Non-destructive maturity classification of durian based on fractal features. *The 10th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Qi, L., Zhao, M. C., Li, Z., Shen, D. H., & Lu, J. (2020). Non-destructive testing technology for raw eggs freshness: a review. *SN Applied Sciences*, 2(6): 1-9.
- Ragni, L., Al-Shami, A., Berardinelli, A., Mikhaylenko, G. & Tang, J. (2007). Quality

- Wang, F., Lin, H., Xu, P., Bi, X., & Sun, L. (2021). Egg Freshness Evaluation Using Transmission and Reflection of NIR Spectroscopy Coupled Multivariate Analysis. *Foods*, 10(9): 2176.
- Yalcin, H. (2017). Plant phenology recognition using deep learning: Deep-Pheno. In *6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax VA, USA.
- Yao, K., Sun, J., Zhang, L., Zhou, X., Tian, Y., Tang, N., & Wu, X. (2021). Non-destructive detection for egg freshness based on hyperspectral imaging technology combined with harris hawks optimization support vector regression. *Journal of Food Safety*, 41(3): e12888.
- Yimenu, S. M., Kim, J. Y., & Kim, B. S. (2017). Prediction of egg freshness during storage using electronic nose. *Poultry science*, 96(10): 3733-3746.
- Yongwei, W., Wang, J., Zhou, B. & Lu, Q. (2009). Monitoring storage time and quality attribute of egg based on electronic nose. *Analytica Chimica Acta*, 650(2): 183-188.
- Zhao, J., Lin, H., Chen, Q., Huang, X., Sun, Z. & Zhou, F. (2010). Identification of egg's freshness using NIR and support vector data description. *Journal of food Engineering*, 98(4): 408-414.
- Zhang, W., Pan, L., Tu, S., Zhan, G. & Tu, K. (2015). Non-destructive internal quality assessment of eggs using a synthesis of hyperspectral imaging and multivariate analysis. *Journal of Food Engineering*, 157: 41-48.