تحقیقات مهندسی صنایع غذایی/جلد۲۳ / شماره /۷۵ / پاییز و زمستان/ ۱۴۰۲ /ص ۸۵ - ۱۱۰

سایت مجله: https://fooder.areeo.ac.ir

نوع مقاله: مروری

مروری بر حسگرهای زیستی بر پایه آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها و کورکومین‌ها در بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی

بهاره نوروزی[1*]، نگین خشنود[2] و سارا سوری[2]

[1*] دانشیار گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[2] دانشجوی کارشناسی‌ارشد بیوتکنولوژی میکروبی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده

بسته بندی‌های هوشمند با به کارگیری موادی که از طریق یک نشانگر داخلی یا خارجی با محیط بسته‌بندی پایش و تعامل دارند، اطلاعات وضعیت غذای بسته‌بندی شده را به مصرف‌کننده ارائه می‌دهند. استفاده از رنگ‌های مصنوعی به عنوان نشانگرهای تازگی غذا در بسته‌بندی‌های مواد غذایی نه تنها دارای ویژگی‌های سمی، سرطان‌زایی و جهش‌زایی هستند، بلکه سلامت مصرف‌کنندگان و محیط زیست را نیز تهدید می‌کنند و علاوه بر آن برای کاربردهای غذایی مناسب نیستند. اما مواد مبتنی بر طبیعت می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای استفاده به‌عنوان نشانگرها و حسگرها باشند. بنابراین، هدف از نگارش مقالهٔ مروری حاضر، بررسی آخرین اطلاعات در مورد حسگرهای زیستی ساخته شده بر اساس ترکیبات به‌دست آمده از عصاره‌های طبیعی در بسته‌بندی‌های مواد غذایی است. بدیهی است عصاره‌های زیست فعال بر پایهٔ آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها و کورکومین‌های به دست آمده از منابع طبیعی، از جمله محصولات جانبی صنایع غذایی هستند که پتانسیل قابل توجهی برای عملکرد به عنوان حسگرهای زیستی دارند.

واژه‌های کلیدی: بسته‌بندی هوشمند، آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها و کورکومین‌ها، ماندگاری مواد غذایی، تازگی مواد غذایی

مقدمه

حسگر وسیله‌ای است برای تشخیص، مکان‌یابی، یا کمی‌سازی انرژی یا ماده با تشخیص یا اندازه‌گیری ویژگی فیزیکی یا شیمیایی که دستگاه به آن واکنش نشان می‌دهد. تفاوت اساسی بین سنسور و نشانگر این است که حسگر از یک گیرنده و یک مبدل تشکیل شده است، در حالی که نشانگر در طراحی بسیار ساده‌تر است و اطلاعات را از طریق تغییر مستقیم بصری قابل مشاهده می‌سازد. در حسگرهای زیستی، گیرنده‌ها می‌توانند آنزیم‌ها، آنتی‌ژن‌ها، میکروب‌ها، هورمون‌ها و اسیدهای نوکلئیک باشند که می‌توانند به صورت جداگانه یا ترکیبی استفاده شوند (Halonen *et al.*, 2020).

مواد مختلف بسته‌بندی مواد غذایی با نشانگر یا حسگر در حال حاضر در بازار موجود است. هنگام طراحی سنسور/نشانگر ایده‌آل، معیارهای مختلفی باید در نظر گرفته شود. برای مثال، سنسوری که تغییر در محیط را اندازه‌گیری می‌کند، باید واکنش برگشت‌پذیر را واسطه کند تا بتواند تغییرات را به‌طور مداوم نظارت کند، به‌ویژه زمانی که در مکانی دور مستقر می‌شود. علاوه بر آن، باصرفه بودن نیز عاملی مهم است، به ویژه برای سنسورها/شاخص‌هایی که

نگارنده مسئول: **Email**: bahare77biol@gmail.com

http://doi: 10.22092/FOODER.2024.362829.1370

© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

در مواد بسته‌بندی به کار می‌روند. از آنجایی که مواد بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل نگرانی‌های بهداشتی بازیافت نمی‌شوند، حسگر/ نشانگر باید یک بار مصرف یا "oneshot" باشد (Sani, *et al*., 2021).

بسته‌بندی هوشمند با سنسور بسیار دقیق و گران‌قیمت است، منجر به کاهش رقابت‌پذیری قیمت محصول اصلی در بازار می‌شود، و بنابراین از نظر تجاری قابل دوام نخواهد بود. محصولات غذایی تازه به دلیل آسیب‌دیدگی‌های فیزیکی به راحتی تجزیه می‌شوند؛ این آسیب‌دیدگی‌ها در اثر جابه‌جایی، حمل و نقل و ذخیره سازی و از واکنش‌های شیمیایی، عملکرد آنزیم‌ها و فساد میکروبی ایجاد می‌شوند. از این نظر، استفاده از بسته‌بندی، انتخابی است استراتژیک برای حفاظت و نگهداری مواد غذایی زیرا به عنوان مانعی در برابر گازها (اکسیژن، دی اکسید کربن)، بخار آب و گرد و غبار عمل می‌کند (Nemes et al., 2020).

این امر به تضمین ایمنی و کیفیت محصولات غذایی، هم برای تامین‌کنندگان و هم برای مصرف‌کنندگان، کمک می‌کند و در نتیجه باعث کاهش ضایعات مواد غذایی و ایمنی بیشتر برای مصرف‌کنندگان می‌شود. افزون براین، بسته‌بندی مواد غذایی از نظر اقتصادی به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که از خسارت‌های اقتصادی ناشی از آسیب‌هایی که می‌تواند در حین حمل و نقل، مدیریت، و نگهداری مواد غذایی رخ دهد، جلوگیری کنند. بسته‌بندی همچنین نقش مهمی در استراتژی بازاریابی محصول دارد، زیرا کانال ارتباطی بین مصرف‌کننده و صنعت است. بسته‌بندی با اینکه مزایایی دارد، زباله‌های زیادی تولید و مشکلات زیست‌محیطی ایجاد می‌کند، زیرا بیشتر آن‌ها با مواد اولیه نفتی تجدیدناپذیر و تجزیه‌ناپذیر تولید می‌شوند. این مواد کم هزینه‌اند و فرایند پذیری[1] دارند، ضمن اینکه زیست تخریب‌پذیر نیستند و خاک، هوا و آب را آلوده می‌کنند که یکی از مسائل جهانی قرن بیست و یکم است (Mustafa & Andreescu, 2018).

امروزه از ویژگی‌های ضدمیکروبی کیتوزان به‌عنوان مواد بسته‌بندی جدید و جایگزینی مناسب برای بسته‌بندی‌های سنتی مبتنی بر نفت استفادهٔ زیادی می‌شود که شامل پلیمرهای زیستی هستند و از منابع تجدیدپذیر محسوب می‌گردند. بسته‌بندی همچنین می‌تواند نقش فعالی در نگهداری مواد غذایی داشته باشد و ممکن است در فروشگاه، ویترین اطلاعاتی در مورد وضعیت مواد غذایی بسته‌بندی شده‌باشد، بنابراین، به مبارزه با ضایعات مواد غذایی و خراب شدن مواد غذایی کمک می‌کند. در این راستا، بسته بندی‌های فعال و هوشمند در حال مطالعه و توسعه هستند و رسالت مهمی در صنعت بسته بندی مواد غذایی به نمایش می‌گذارند (Becerril et al., 2021).

بسته بندی فعال شامل استفاده از موادی است که می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم موادی را از خود آزاد یا به خود جذب کنند و شرایط جو بسته را به گونه‌ای مطلوب تغییر دهند که عمر نگهداری مادهٔ غذایی را بالا برد. این فناوری بسته‌بندی از ترکیبات فعال با ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی یا ضدمیکروبی استفاده می‌کند که در شبکهٔ پلیمری برای ساخت پوشش‌ها و برچسب‌ها استفاده می‌شود. ترکیبات فعال به‌کار رفته (مانند ترکیبات فنلی) را می‌توان از گیاهان به دست آورد که شامل محصولاتی مانند کنف، کاردون و شاهدانه، جلبک ها، گیاهان دارویی، ادویه، میوه‌ها یا سبزی‌هاست (Salgado et al., 2021).

بسته بندی فعال را می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم کرد: آنتی اکسیدان (مثل هیدروکسی تولوئن بوتیله، ویتامین C، ویتامین E)، ضد میکروبی (مانند اسانس، پپتید، ترکیبات فنلی)، جاذب‌ها یا پاکسازی‌کننده‌ها[2] (مانند تنظیف‌کنندهٔ اکسیژنی، جاذب‌ها یا ساطع کننده‌های دی

[1] Processability
[2] scavengers

اکسید کربن، عوامل کنترل رطوبت و جاذب‌های اتیلن یا پاکسازی کننده‌ها) (Sobhan *et al.*, 2021).

بسته‌بندی‌های هوشمند از این هم فراتر می‌روند و با به‌کارگیری موادی که از طریق یک نشانگر داخلی یا خارجی با محیط بسته‌بندی پایش و تعامل دارند، اطلاعات وضعیت غذای بسته‌بندی شده را به مصرف‌کننده ارائه می‌دهند. بسته‌بندی هوشمند را می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم کرد: نشانگرها، حسگرها و حامل‌های داده (Yousefi *et al.*, 2019).

نشانگرها میزان واکنش بین مواد مختلف، غلظت ماده‌ای خاص، و بودن یا نبودن ماده را تعیین می‌کنند. به طور کلی، نشانگرها اطلاعات را از طریق تغییر بینایی ارائه می‌دهند. بیشتر نشانگرها روی تشخیص زمان-دما، بو، و تشکیل گاز متمرکز شده‌اند، و با تغییرات رنگی به‌راحتی توسط مصرف‌کننده قابل شناسایی هستند (Müller & Schmid, 2019).

حامل‌های داده قابلیت ردیابی، خودکارسازی[3] و محافظت را در برابر سرقت و جعل دارند و راهی برای انتقال اطلاعات در زنجیرهٔ تامین مواد غذایی هستند، درحالی که تماس با محصول ندارند. برچسب‌های بارکد یا فناوری شناسایی بی‌سیم (RFID سامانه شناسایی امواج رادیویی)[4] عمومی‌ترین روش حامل‌های داده‌ای هستند (Abedi-Firoozjah *et al.*, 2022).

حسگرها ابزارهای الکترونیکی هستند که برای تشخیص و کمتی کمی کردن تغییرات به کار می‌روند و این کار را از طریق گیرنده‌ای به انجام می‌رسانند که قادر است داده‌ها را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل کند. حسگرهای زیستی یکی از انواع حسگرهای مربوط به واکنش‌های بیولوژیکی هستند که در آن گیرندهٔ زیستی علامت بیوشیمیایی را تشخیص می‌دهد و با به‌کارگیری یک مبدل، آن را به یک پاسخ الکترونیکی قابل اندازه گیری تبدیل می‌کند. حسگرهای زیستی می‌توانند عوامل بیماری زا، حساسیت‌زا و دیگر ترکیبات سمی را شناسایی کنند (Abedi-Firoozjah *et al.*, 2022).

بسته‌بندی هوشمندانه شامل هر دو سیستم بسته‌بندی فعال و هوشمند است که منظور از آن‌ها ارائهٔ اطلاعات دقیق‌تر در مورد شرایط محصول غذایی به مصرف‌کننده است؛ این نوع بسته‌بندی‌ها با استفاده از آنتی اکسیدان‌ها و عوامل ضد میکروبی اثر محافظتی روی محصول غذایی را به نمایش می‌گذارند. بسته‌بندی هوشمندانه می‌تواند محصول غذایی را با تجزیه و تحلیل و کنترل محیط داخلی یا خارجی ردیابی کند و در هر لحظه اطلاعاتی را به کل زنجیرهٔ تامین مواد غذایی از تولیدکنندگان تا مصرف‌کنندگان ارائه دهد (Cheng et al., 2022).

مواد مبتنی بر طبیعت می‌توانند به‌جای پلاستیک‌های مصنوعی سنتی به‌کار روند و به عنوان نشانگر و حسگر استفاده شوند. برای مثال، رنگ‌ها و عصاره‌های طبیعی، با توانایی تغییر رنگ بر اساس تغییرات فیزیولوژیکی مواد غذایی، ممکن است جایگزین رنگ‌های مصنوعی شوند. به طور کلی این رنگدانه‌ها در شبکهٔ پلیمری گنجانده می‌شوند و بر اساس تغییرات pH ناشی از رشد میکروبی تغییر رنگ می‌دهند. بنابراین، رنگدانه‌های طبیعی که دوست‌دار محیط زیست و کمتر سمی هستند می‌توانند جایگزین رنگدانه‌های مصنوعی موجود باشند که ممکن است به مصرف کنندگان آسیب برسانند. استفاده از ترکیبات طبیعی که می‌توانند به عنوان نشانگر عمل کنند ممکن است به مصرف‌کننده پاسخ دقیقی در مورد کیفیت غذا بدهند و جایگزینی برای ترکیبات مصنوعی شیمیایی باشند. در این مقاله مروری، جدیدترین پیشرفت‌های تحقیقاتی در زمینه حسگرهای

[3] automatization
[4] Radio Frequency Identification

زیستی مورد استفاده در بسته‌بندی‌های هوشمند برای محصولات غذایی ارائه می‌گردد (*Dodero et al.*, 2021).

بسته بندی هوشمند مواد غذایی

فناوری بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی با گنجاندن نشانگرها، حسگرها و شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) در بسته‌بندی‌ها، نظارت بر کیفیت غذاها را امکان‌پذیر کرده است. این فناوری همچنین به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد تا تاریخ یک محصول را از طریق نکات مهم در زنجیره تامین مواد غذایی ردیابی کنند (*Balbinot-Alfaro et al.*, 2019). در زیر به کاربردهای بسته بندی هوشمند اشاره می‌شود.

نشانگرهای دمان-زمان (TTI) [5]

از آنجایی که بیشتر محصولات تازه در زنجیره سرد توزیع و نگهداری می‌شوند، اولین روش تجاری توسعه یافته برای نظارت بر کیفیت غذا، TTI است. TTIها می‌توانند دمایی را که محصول در معرض آن می‌تواند قرار گیرد منعکس کنند. این واکنش‌ها وابسته به دما هستند و سرعت واکنش‌ها در دماهای بالا افزایش می‌یابد. TTIهای نسل اول از آنزیم لیپاز برای منعکس کردن تغییرات رنگ وابسته به pH در نتیجهٔ هیدرولیز لیپید استفاده می‌کنند. از آنجایی که اتولیز آنزیمی و رشد میکروبی علل اصلی فساد گوشت هستند، از TTIهای مبتنی بر واکنش بیولوژیکی استفاده می‌شود (*Chaudhary et al.*, 2022). آنزیم‌ها و میکروب‌ها نسبت به دیگر انواع TTI به عنوان شاخص‌های تازگی محصولات غذایی مزایایی دارند، زیرا می‌توانند روند واقعی فرآیندهای بدتر شدن گوشت را بهتر منعکس کنند. TTIها را می‌توان به راحتی در مواد بسته‌بندی ماهی منجمد، محصولات لبنی، محصولات گوشتی تازه و منجمد، میوه‌ها و سبزی‌های منجمد و غیره گنجاند. اکثر TTIهای تجاری موجود، تغییر رنگ را به‌صورت وابسته به زمان و بر اساس ویژگی‌های خاص خود نشان می‌دهند (*Bhargava et al.*, 2020).

متابولیت ها، پارامترهایی برای تشخیص کیفیت مواد غذایی

برخلاف TTI که اطلاعات غیرمستقیم را در مورد تازگی و کیفیت آن دسته از غذاهایی ارائه می‌کند که از نظر دمایی محصول در معرض آن دما قرار گرفته‌است، یک نشانگر/ حسگر می‌تواند اطلاعات مستقیم را ارائه دهد. در شرایط بسته‌بندی معمولی که در آن از مواد پاک‌کننده خاصی استفاده نمی‌شود، متابولیت‌های متعددی مانند گلوکز، اسید لاکتیک، CO2، O2، ترکیبات نیتروژن فرار و آمین‌های بیوژنیک در فضای سرپوشیده و در محیط بسته تشکیل می‌شوند. بنابراین، این متابولیت‌ها می‌توانند به عنوان پارامترهای نشان‌دهنده کیفیت به‌کار گرفته شوند و بدین ترتیب از نظر تئوری می‌توان با استفاده از یک نشانگر/ حسگر که می‌تواند این آنالیت‌ها را در مواد بسته‌بندی تشخیص دهد، فساد را تشخیص داد (Fernandez *et al.*, 2023). جدول ۱ فهرستی از پارامترهای نشان دهندهٔ کیفیت مورد استفاده در حال حاضر و همچنین انواع نشانگرها و حسگرهایی را نشان می‌دهد که از آن‌ها به عنوان آنالیز استفاده می‌کنند. از آنجایی که گلوکز، بستر ارجح برای بسیاری از باکتری‌های مسئول فساد گوشت است، اندازه‌گیری گلوکز را می‌توان برای پیش‌بینی ماندگاری باقی‌مانده گوشت استفاده کرد. شاخص‌های گلوکز براساس یک واکنش شیمیایی است که تغییر رنگ ایجاد می‌کند. با توجه به اهمیت نظارت بر سطح گلوکز خون در بیماران دیابتی، حسگرهای گلوکز، اولین حسگرهای بیولوژیکی بودند که ساخته و تجاری شدند. در صنایع غذایی، از حسگرهای گلوکز برای واجد شرایط بودن میوه‌های استوایی

[5] Time Temperature Indicator (TTI)

و نوشیدنی‌های الکلی استفاده می‌شود. در عضله پس از مرگ، گلوکز می‌تواند از طریق تخمیر بی‌هوازی به اسید لاکتیک و پروتون تجزیه شود. غلظت اولیهٔ اسید لاکتیک می‌تواند به عنوان یک شاخص پیش‌بینی کننده برای ماندگاری گوشت منجمد عمل کند (Luo *et al.*, 2022).

جدول ۱: فهرستی از پارامترهای نشان دهندهٔ کیفیت و انواع نشانگرها و حسگرهای مورد استفاده در آنالیز مواد غذایی

Table 1. Principles of indicators and sensors based on metabolites.

Sensors/حسگرها	Indicators/نشانگرها	Food products/محصولات غذایی	Metabolites/متابولیت ها
Electrochemical sensor by redox reaction حسگر الکتروشیمیایی توسط واکنش ردوکس	Colorimeter based on pH کالریمتری بر اساس pH	Fermented food, Meat گوشت، غذاهای تخمیر شده	Glucose / Lactic acid گلوکز/اسید لاکتیک
Electrochemical sensor by Silicon-based Polymers حسگر الکتروشیمیایی توسط پلیمرهایی بر اساس سیلیکون	Colorimeter based on PH کالریمتری بر اساسpH	Fermented food, Meat گوشت، غذاهای تخمیر شده	Carbon dioxide دی اکسید کربن
Electrochemical sensor by Zirconia, laser حسگر الکتروشیمیایی توسط زیرکونیا، لیزر	Optical sensor by fluorescence, Colorimeter based on pH-indicator dye حسگر نوری توسط فلورسنس کالریمتری بر اساس رنگ نشانگر pH	Meat, Vegetable گوشت، سبزی‌ها	Oxygen اکسیژن
Electrochemical sensor by enzyme redox reaction حسگر الکتروشیمیایی توسط آنزیم های واکنش ردوکس	Color-changing pH-sensitive dyes تغییر رنگ بر اساس رنگ‌های حساس به pH	Fish, Meat گوشت، ماهی	Biogenic amines آمین‌های بیوژنیک

تشکیل اسید لاکتیک

تشکیل‌شدن اسید لاکتیک را می‌توان به راحتی با چندین رنگ نشانگر pH تشخیص داد، بهترین رنگ نشانگر سبز بروموکرزول و پس از آن بنفش بروموکرزول، بروموفنول آبی، کلروفنول قرمز و قرمز کنگو به ترتیب نزولی است. حسگرهای اسید لاکتیک بر اساس فعالیت‌های اکسیداز لاکتات و پراکسیداز با استفاده از فروسن به عنوان دیاتورمن ساخته شده‌اند. این حسگرها برای تعیین تازگی نمونه‌های مواد غذایی تخمیر شده مانند شراب و ماست ساخته شده‌اند.

بسته بندی با اتمسفر تغییر یافته (MAP)

بسیاری از محصولات غذایی به سرعت در هوا فاسد می‌شوند، از این رو روش بسته بندی با اتمسفر تغییر یافته (MAP) برای حفظ کیفیت و افزایش عمر مفید مواد غذایی با اجتناب از تماس با هوا توسعه یافته‌است (He *et al.*, 2023). در این روش، سه گاز اصلی CO2، O2 و N2 بسته به نوع محصول غذایی به طور مستقل یا ترکیبی استفاده می‌شوند. برای مثال، اکسیژن یک محرک نامطلوب برای تخریب مواد غذایی است و از این نظر MAP برای کاهش تماس محصولات غذایی با محیط استفاده می‌شود. به طور معمول MAP شامل غلظت پایین O2 (صفر تا دو درصد) و غلظت بالای CO2 (۲۰ تا ۸۰ درصد) است. هنگامی که CO2 در محلول‌های آبی حل می‌شود، اسید کربنیک تشکیل می‌شود و یون‌های بی کربنات و پروتون آزاد خواهند شد. بنابراین، شاخص CO2 عمدتاً در دتکتورها با استفاده از رنگ‌های نشانگر pH رنگ‌سنجی می‌شود. انواع مختلفی از سنسورهای O2 نیز موجود است که از فناوری‌های

الکتروشیمیایی، فرو سرخ ، اولتراسونیک و لیزر استفاده می‌کنند (Kuswandi *et al.*, 2022).

حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی

به نظر می‌رسد یکی از امیدوارکننده ترین روش‌ها برای نظارت مداوم بر کیفیت مواد غذایی به‌کارگیری حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی باشد که می‌توانند یک سیگنال الکتریکی بر اساس غلظت آنالیت تولید کنند. در میان انواع مختلف حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی، ساده‌ترین رویکرد استفاده از آنزیم‌ها، به عنوان عناصر شناسایی است. استفاده از این سنسورها نسبتاً آسان است؛ سنسورها اندازهٔ کوچک دارند، ارزان هستند و معمولاً به ابزار دقیق اضافی نیاز ندارند، بنابراین می‌توان آن‌ها را به راحتی با مواد بسته‌بندی سازگار کرد. افزون بر این، به دلیل ماهیت ذاتی آنزیم‌ها، این حسگرهای زیستی بسیار اختصاصی و انتخابی هستند (Dudnyk *et al.*, 2018).

حسگر بیوکاتالیستی با استفاده از سلول‌های کامل یا برش‌های بافت این مزیت را دارد که: (۱) به فرآیندهای تصفیهٔ گسترده مانند آنزیم‌ها نیاز ندارد، (۲) ممکن است فعالیت بهتری نسبت به آنزیم‌های جداشده داشته باشد، (۳) برخی از آنزیم‌ها ممکن است تجاری نباشند یا از نظر فیزیکی در حالت خالص در دسترس هستند، و (۴) آنزیم‌های جدا شده، در مقایسه با آنزیم‌های موجود در اشکال بومی، ممکن است پایداری و ماندگاری محدودی داشته باشند. معایب ممکن است شامل از دست دادن گزینش‌پذیری و ویژگی به دلیل وجود دیگر آنزیم‌های آلوده‌کننده و زمان پاسخ کند باشد.

حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی ایده‌آل برای تشخیص تازگی گوشت، تکنیک آمپرومتریک است که مستقیماً تغییرات تولید شده توسط واکنش‌های ردوکس را با زمان نظارت می‌کند. این تکنیک، نسبت به دیگر تکنیک‌های تشخیص الکتروشیمیایی، چندین مزیت ارائه می‌کند: (۱) قدرت انتخاب‌پذیری بالایی دارد، (۲) حد تشخیص نسبتاً کمی دارد، (۳) نسبتاً ساده است، و (۴) سیگنال پس‌زمینه را می‌توان به حداقل رساند (Ghoshal, 2018).

به منظور تعیین تازگی گوشت با استفاده از نشانگر/حسگر، درک مکانیسم‌های فساد گوشت ضروری است. بافت فرآورده‌های گوشتی، از جمله گوشت گاو، گوشت خوک و مرغ، عمدتاً از پروتئین‌ها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی و رطوبت تشکیل شده‌است و بنابراین مکانیسم‌های فساد آن‌ها مشابه است (Dodero *et al.*, 2021).

رشد میکروبی، اکسیداسیون و هضم آنزیمی سلول‌ها اساساً سه مکانیسم اصلی مسئول فساد گوشت هستند. طی فساد گوشت، پروتئین‌ها و لیپیدها تجزیه می‌شوند و ترکیبات جدیدی تشکیل می‌دهند که بر کیفیت محصولات گوشتی تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، درک مکانیسم‌های فساد گوشت به منظور توسعهٔ روشی بهینه برای تشخیص این ترکیبات واسطه طی فساد به عنوان معیاری کمی برای تازه‌بودن گوشت مهم است. فساد میکروبی گوشت زمانی اتفاق می‌افتد که میکروب‌های موجود در محصول یا داخل آن بر کیفیت گوشت تأثیر منفی بگذارند. شرایط فساد ممکن است بسته به انواع میکروب‌های موجود در میکرو فلور (باکتری ها، مخمرها و کپک ها) متفاوت باشد که تحت تاثیر عوامل درونی و بیرونی قرار می‌گیرند (Arroyo *et al.*, 2019). عوامل درونی ممکن است شامل pH، فعالیت آب و محتوای مواد مغذی گوشت باشد و عوامل بیرونی ممکن است شامل دمای نگهداری محصولات و فضایی باشد که محصول را احاطه کرده است. عوامل درونی ممکن است به طور یکنواخت در سراسر محصول توزیع نشوند و عوامل بیرونی ممکن است یکدست نباشند، از این رو فساد توسط میکروفلور لزوماً در تمام قسمت‌های گوشت با سرعت یکسان رخ نمی‌دهد. در خلال اولین مرحلهٔ فساد میکروبی،

میکروب، پیش از اینکه شروع به تجزیهٔ پروتئین‌های پیچیده تر کند، از سوبستراهای ساده مانند گلوکز، اسید لاکتیک و اسیدهای آمینه استفاده می‌کند که به راحتی در بافت عضلانی موجود هستند. افزون بر این، آزاد شدن اسید لاکتیک در عضلهٔ پسین منجر به تجمع اسید لاکتیک و در نتیجه کاهش pH به حدود ۵/۵ می‌شود (Neethirajan *et al.*, 2018).

میکروب‌هایی که می‌توانند بر کیفیت محصولات گوشتی تأثیر منفی بگذارند به احتمال زیاد از سودوموناها ناشی می‌شوند. حسگر یا شاخصی که سودوموناهای خاص را از طریق واکنش‌های آنتی‌ژن/ آنتی‌بادی یا دیگر واکنش‌های مشابه تشخیص دهد در مواد بسته بندی گنجانده شده است، اما این کار نیاز دارد به تماس مستقیم بین پروب و میکروب‌های هدف. به سخنی دیگر، این بیوسنسور یا شاخص باید با کل سطح محصول تماس پیدا کند تا خرابی نقطه‌ای را تشخیص دهد وگر نه ممکن است خطای نمونه گیری رخ دهد. مشکل آنجاست که خراب شدن یک قسمت از کالا می‌تواند کل محصول را غیرقابل قبول کند (Neethirajan *et al.*, 2018).

فساد گوشت در اثر اکسیداسیون عمدتاً از دو بخش تشکیل شده است: پراکسیداسیون چربی و اکسیداسیون پروتئین. به دلیل سطوح بالای غیراشباع در فسفولیپیدها، اولین مرحله اتولیز اکسیداتیو در گوشت، همراه با پراکسیداسیون لیپیدی است که در آن اکسیژن (O2) با اسید چرب غیراشباع واکنش می‌دهد و رادیکال آزاد تشکیل خواهد داد. این رادیکال آزاد می‌تواند با O2 واکنش دهد و یک رادیکال پراکسیل ایجاد کند که به نوبهٔ خود می‌تواند با یک مولکول اسید چرب دیگر برای انتشار واکنش زنجیره ای واکنش نشان دهد. هنگامی که دو رادیکال آزاد یا دو رادیکال پراکسیل با هم واکنش می‌دهند یا رادیکال‌ها با سایر اجزای موجود در گوشت مانند ویتامین‌ها و اسیدهای‌آمینه واکنش نشان می‌دهند، ممکن است واکنش خاتمه یابد. طی پراکسیداسیون لیپیدی، آلدئیدها به عنوان محصولات جانبی تشکیل می‌شوند که بر کیفیت محصولات گوشتی تأثیر منفی می‌گذارند. مکانیسم اکسیداسیون پروتئین کمی متفاوت‌تر از پراکسیداسیون لیپیدی است، زیرا پیوندهای دوگانه غیراشباع، که مستعد اکسیداسیون هستند، به آسانی در پروتئین‌ها مانند لیپیدها در دسترس نیستند. اکسیداسیون پروتئین معمولاً با واکنش بین بقایای اسیدآمینه و محصولات پراکسیداسیون لیپیدی یا یون‌های فلزات واسطه آغاز می‌شود (Song *et al.*, 2022).

اتولیز آنزیمی، شامل پروتئولیز و هیدرولیز چربی، علت اصلی خرابی گوشت است و به عنوان پیش‌نیاز برای ترکیب میکروبی عمل می‌کند. با پیشرفت اتولیز آنزیمی، بافت عضلانی نرم می‌شود و رنگ مایل به سبز خواهد شد و در نهایت محصول را ترش می‌کند و پایان عمر مفید را نشان می‌دهد. برخی از آنزیم‌های اصلی که مسئول اتولیز پروتئولیتیک هستند، کالپین‌ها، کاتپسین‌ها و آمینوپپتیدازها هستند. این آنزیم‌ها معمولاً در دماهای پایین فعال هستند، که منجر به بدتر شدن کیفیت گوشت به دلیل رشد میکروبی و تولید آمین‌های بیوژنیک، حتی در فرآیند سرد کردن، می‌شود (Kalpana *et al.*, 2019).

در اکثر حسگرهای الکتروشیمیایی بیوکاتالیستی، عناصر شناسایی روی سطح الکترود تثبیت می‌شوند. یکی از اشکالات عمدهٔ سنسورهای بیوکاتالیستی، پایداری آن‌هاست که به طور مستقیم با ماندگاری و پایداری عملیاتی این سنسورها مرتبط است. به منظور حصول اطمینان از گزینش‌پذیری و خاص بودن سنسور، تکنیک‌های بی‌حرکتی مختلفی توسعه داده شده است، در حالی که از حفظ فعالیت آن‌ها اطمینان حاصل می‌شود. روش‌های متداول بی‌حرکتی برای آنزیم‌ها عبارت‌اند از گیرافتادن آنزیم با استفاده از پلیمر یا ژل، جذب سطحی، اتصال کووالانسی، برهمکنش الکترواستاتیکی، کپسوله‌سازی، کونژوگه شدن به نانوذرات، جهش‌زایی خاص مکان و برهمکنش بیولوژیکی مانند اتصال

بیوتیناویدین. حتی زمانی که بی‌حرکتی پایداری را با موفقیت افزایش می‌دهد، طول عمر حسگرهای بیوکاتالیستی به ۲۸ هفته محدود می‌شود، زیرا آنزیم یا دیگر عناصر شناسایی به تدریج فعالیت خود را از دست می‌دهند. به طور معمول، ماندگاری ۲۸ هفته ممکن است برای انواع دیگر کاربردها بسیار کوتاه باشد، اما باید زمان کافی برای نظارت بر تازگی محصولات غذایی فراهم کند (Ghasemi-Varnamkhasti *et al*., 2018).

نشانگرهای تازگی مواد غذایی

حسگرهایی که از ترکیبات به‌دست آمده از محصولات طبیعی و پلیمرهای زیستی استفاده می‌کنند و به عنوان بسته‌بندی هوشمند برای محصولات غذایی به‌کار برده می‌شوند، عمدتاً بر نشانگرهای تازگی تمرکز دارند. نشانگرها وظیفه دارند اطلاعات را در مورد تغییرات رخ‌داده در محصول غذایی یا محیط اطراف ارائه کنند، و اطلاعات دقیق‌تری در مورد وضعیت محصول غذایی برای مصرف‌کنندگان ارائه دهند (Yong & Liu, 2020).

از نشانگرهای تازگی در بسته‌بندی های هوشمند برای ارائهٔ اطلاعات در مورد روال کیفیت غذا استفاده می‌شود.

این نوع نشانگرها بیشتر بر اساس پاسخ رنگ‌سنجی بصری است که ناشی از تغییر شیمیایی یا میکروبیولوژیکی محصول غذایی است. این نوع نشانگرها عموماً ناشی از تغییر pH هستند و به حسگر واکنش نشان می‌دهند و تغییرات کیفیت محصول را موجب می‌شوند. سنسور یا نشانگر تازگی را می‌توان به شکل برچسب، پلاک یا نشانگر بصری اعمال کرد (Motelica *et al*., 2020).

نشانگر تازگی را می‌توان به نشانگر مستقیم یا غیرمستقیم تقسیم کرد. نشانگرهای مستقیم آن‌هایی هستند که بر اساس واکنش مستقیم با متابولیت یا سم خاص تولید شده است، در حالی که نشانگرهای غیرمستقیم بر اساس واکنش غیرمستقیم ناشی از تغییرات شیمیایی یا میکروبیولوژیکی است که محیطی راکه غذا در آن قرار می‌گیرد تغییر می‌دهد (Drago *et al*., 2020).

برای کمک به حفظ کیفیت غذا، نشانگرهای تازگی بر مبنای تغییر رنگ رنگدانه‌هایی عمل می‌کنند که به نشانگر اضافه می‌شوند و به تغییرات pH واکنش نشان می‌دهند. رنگ‌های مصنوعی که معمولاً استفاده می‌شوند، شامل متیل قرمز رنگ، بروموکرزول بنفش، بروموفنول آبی و کلروفنول قرمز هستند که ثابت شده است می‌توانند به تغییرات pH واکنش نشان دهند و در سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند به‌کار آیند. ثابت شده است رنگ‌های مصنوعی موثر هستند، اما به دلیل ویژگی‌های سمی، سرطان‌زایی و جهش‌زایی‌شان برای کاربردهای غذایی مناسب نیستند، این مواد نه تنها سلامت مصرف‌کنندگان بلکه محیط زیست را نیز تهدید می‌کنند (Amin *et al*., 2022).

استفاده از رنگ‌های طبیعی به جای رنگ‌های مصنوعی با روند مصرف برای انتخاب‌های سالم‌تر و پایدارتر مطابقت دارد. رنگدانه‌های طبیعی استخراج شده از گیاهان و میوه‌ها تجدیدپذیر هستند، نشانه‌های سمیت‌کم و اثرهای زیست محیطی مختصر دارند. برای استفاده به عنوان نشانگر pH، در نظر گرفتن پایداری و پاسخ pH رنگدانه ها الزامی است. اخیراً استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در شبکه های پلیمری زیستی در سیستم های بسته‌بندی مواد غذایی آغاز شده است. علاوه بر این، اکثر رنگدانه‌های طبیعی و شبکه های زیست‌پلیمری دارای خواص زیست فعال هستند که نه تنها به عنوان نشانگر pH بلکه با ارائهٔ خواص فعال به نشانگر برای محصول غذایی نیز عمل می‌کنند (جدول ۲) (Ghasemi-Varnamkhasti *et al*., 2018).

جدول ۲: کاربرد غذایی حسگرهای زیستی pH مبتنی بر ترکیبات زیستی فعال (Drago *et al.*, 2020).

Table 2. Food application of bio-based pH sensors.

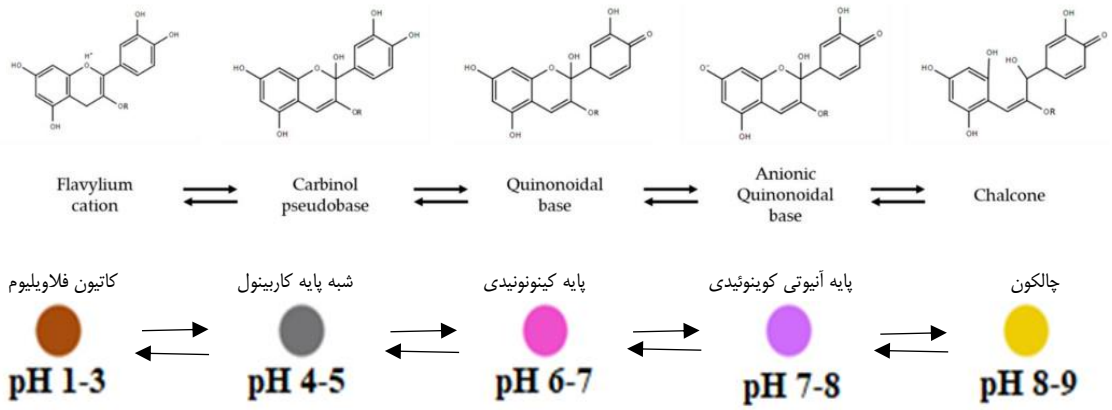
Food Application مادهٔ غذایی مورد استفاده	Major Results/ نتایج	Function/ عملکرد	Sensor Material (Source/Type) منبع حسگر زیستی	Matrix/ شبکه
Shrimp میگو	•Films in contact with milk produced a color change from grayish purple to dark pink due to lactic acid production; (acidic conditions); • Films when exposed to shrimp caused a color change from grayish purple to yellow due to volatile amines production; (alkaline conditions). • فیلم‌های در تماس با شیر به دلیل تولید اسید لاکتیک تغییر رنگی از بنفش مایل به خاکستری به صورتی تیره ایجاد کردند. (شرایط اسیدی)؛ • فیلم‌هایی که در معرض میگو قرار می‌گیرند باعث تغییر رنگ از بنفش مایل به خاکستری به زرد به دلیل تولید آمین‌های فرار می‌شود. (شرایط قلیایی).	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds and to lactic acid production through pH change حساسیت فیلم‌ها به ترکیبات نیتروژن فرار و تولید اسید لاکتیک از طریق تغییر pH	*Lycium ruthenicum.* anthocyanins گیاه تیغ گرگ آنتوسیانین‌ها	κ—carrageenan κ- کاراگینان
Prawn and poultry meat میگو و گوشت مرغ	•A color response was observed in a pH range from 2 to 12; •As a response to volatile nitrogenous compounds produced from prawn and poultry meat spoilage, films changed from red to grey-purple. • پاسخ رنگ در محدوده pH از ۲ تا ۱۲ مشاهده شد. • در پاسخ به ترکیبات نیتروژنی فرار تولید شده از فساد گوشت میگو و طیور، فیلم‌ها از قرمز به خاکستری–بنفش تغییر یافتند.	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	Red raddish—anthocyanins تربچه قرمز – آنتوسیانین	Starch and gelatin نشاسته و ژلاتین
Not applied در حال بررسی	•A color response was observed in a pH range from 1–10; •Films changed their color from red/pink under acidic conditions to purple/blue under alkaline conditions. • پاسخ رنگ در محدوده pH بین ۱ تا ۱۰ مشاهده شد. • فیلم‌ها رنگ خود را از قرمز/صورتی در شرایط اسیدی به بنفش/آبی در شرایط قلیایی تغییر دادند.	pH	Jambolan fruit—anthocyanins میوه جامبولان آنتوسیانین	Methylcellulose متیل سلولز
Salmon ماهی سالمون	• Films changed their color from red to light pink when the salmon was deteriorating. • هنگامی که ماهی قزل آلا رو به زوال بود، فیلم‌ها رنگ خود را از قرمز به صورتی روشن تغییر دادند.	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	Apple pomace—anthocyanins تفاله سیب – آنتوسیانین	Chitosan and TiO2 کیتوزان و TiO2
Prawn and chicken میگو و مرغ	• Foams with anthocyanins were successfully developed; • Foams changed their color when a pH change occurred; • Foams changed from purple to greenish-grey after 3 days in contact with prawn and chicken meat, aligned with food products degradation. • فوم‌های حاوی آنتوسیانین با موفقیت ایجاد شد. • فوم‌ها با تغییر pH رنگ خود را تغییر دادند. • فوم‌ها پس از ۳ روز تماس با میگو و گوشت مرغ از بنفش به خاکستری متمایل به سبز تغییر یافتند که با تخریب محصولات غذایی مطابقت داشت.	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	Red cabbage—anthocyanins کلم قرمز – آنتوسیانین	Composite of polyvinyl alcohol, micro crystalline cellulose and polyvinyl pyrrolidone کامپوزیت پلی وینیل الکل، سلولز میکرو کریستالی و پلی وینیل پیرولیدون

Chitosan and Oxidized chitin nanocrystals کیتوزان و نانوبلورهای کیتین اکسید شده	Black rice anthocyanins برنج سیاه – آنتوسیانین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Films reacted to the contact with shrimp and promfet, and a visible change of color was observed; • Films changed from purple to grey-blue color aligned with the food degradation • فیلم ها به تماس با میگو و پامفرت واکنش نشان دادند و تغییر رنگ قابل مشاهده‌ای مشاهده شد. • رنگ فیلم‌ها از بنفش به خاکستری–آبی تغییر کرد که با تخریب مواد غذایی مطابقت داشت.	Shrimp and promfet میگو وماهی پرومفت
Quaternary ammonium Chitosan Polyvinyl alcohol آمونیوم چهارتایی کیتوزان–پلی وینیل الکل	Cactus pears extract (CPE)—betalains عصارهٔ گلابی کاکتوسی (CPE) – بتالین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Color of the films changed when CPE was added; • CPE addition affected mechanical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of the films; • Films showed sensitivity to volatile nitrogen compounds present on the shrimp container. • رنگ فیلم ها با اضافه شدن CPE تغییر کرد. • افزودن CPE بر خواص مکانیکی، ساختاری، آنتی اکسیدانی و ضدمیکروبی فیلم‌ها تأثیر گذاشت. • فیلم‌ها به ترکیبات نیتروژن فرار موجود در ظرف میگو حساسیت نشان دادند.	Shrimp میگو
Quaternary ammonium chitosan Fish gelatin کیتوزان آمونیوم چهارتایی –ژلاتین ماهی	Amaranth betalains تاج خروس– بتالین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Physical and functional properties of the films were enhanced by amaranth extracts; • pH changes due to the increase in volatile nitrogenous compounds caused a color change from pink to yellow. • خواص فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها با عصاره تاج خروس افزایش یافت. • تغییرات pH به دلیل افزایش ترکیبات نیتروژنی فرار باعث تغییر رنگ از صورتی به زرد شد.	Shrimp میگو
Starch-Polyvinyl alcohol نشاسته–پلی وینیل الکل	Red pitaya—betalains پیتاای قرمز بتالین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Physical and functional properties of the films were enhanced by red pitaya extracts; • pH changes due to the increase in volatile nitrogenous compounds caused a color change from pink to yellow. • خواص فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها با عصاره پیتاای قرمز افزایش یافت. • تغییرات pH به دلیل افزایش ترکیبات نیتروژنی فرار باعث تغییر رنگ از صورتی به زرد شد.	Shrimp میگو
Gelatin-Polyvinyl alcohol ژلاتین–پلی وینیل الکل	Amaranth—betalains تاج خروس – بتالین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Physical and functional properties of the films were enhanced by Amaranth leaf extracts; • Films changed color from red to yellow following food products degradation. • خواص فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها با عصاره برگ تاج‌خروس افزایش یافت. • رنگ فیلم‌ها به دنبال تخریب محصولات غذایی از قرمز به زرد تغییر یافت.	Chicken and Fish مرغ و ماهی
Cellulose سلولز	*Arnebia euchroma* -Naphtho-quinone آرنبیا اوکروما – نفتوکینون	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Films demonstrated a color response in a pH range from 5 to 12; • Films changed their color from rose-red to blue-violet when pH changes occurred. • فیلم ها پاسخ رنگی را در محدوده pH از ۵ تا ۱۲ نشان دادند. • وقتی تغییرات pH رخ داد، فیلم ها رنگ خود را از رز–قرمز به آبی–بنفش تغییر دادند.	Pork and shrimp گوشت خوک و میگو

Cellulose paper کاغذ سلولزی	Gromwell (*Lithospermum erythrorhizon*)—Shikonin گرومول (لیتوسپرموم اریتروریزون) – شیکونین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Films changed from red to blue because of fish and pork degradation • به دلیل تخریب ماهی و گوشت خوک، فیلم‌ها از قرمز به آبی تغییر یافتند.	Fish and Pork ماهی و گوشت خوک
Agar—Polyvinyl alcohol آگار – پلی وینیل الکل	Curcumin کورکومین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Films changed their color from, yellow to orange-red due to ammonia production from shrimp degradation • رنگ فیلم‌ها از زرد به قرمز نارنجی به دلیل تولید آمونیاک در اثر تخریب میگو تغییر یافت.	Shrimp میگو
Tara gum and Polyvinyl alcohol صمغ تارا و پلی وینیل الکل	Curcumin کورکومین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Films changed their color from, yellow to orange-red due to ammonia production from shrimp degradation. • رنگ فیلم‌ها از زرد به قرمز نارنجی به دلیل تولید آمونیاک در اثر تخریب میگو تغییر یافت.	Shrimp میگو
Pectin and sulfur nanoparticles نانوذرات پکتین و گوگرد	Curcumin کورکومین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Addition of curcumin and sulfur nanoparticles improve thermal stability and UV light barrier. • A color change from yellow to orange was observed caused by shrimp degradation. • افزودن نانوذرات کورکومین و گوگرد باعث بهبود پایداری حرارتی و مانع نور UV می‌شود. • تغییر رنگ از زرد به نارنجی ناشی از تخریب میگو مشاهده شد.	Shrimp میگو
Lallemantia iberica seed gum صمغ بذر لالمانتیا ایبریکا	Curcumin کورکومین	Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH	• Mechanical and barrier properties of the films were enhanced by Amaranth leaf extracts; • Films changed their color from, yellow to red due to ammonia production from shrimp degradation. • خواص مکانیکی و بازدارنده فیلم ها با عصاره برگ تاج‌خروس افزایش یافت. • فیلم‌ها به دلیل تولید آمونیاک در اثر تخریب میگو، رنگ خود را از زرد به قرمز تغییر دادند.	Shrimp میگو

استفاده از آنتوسیانین‌ها به عنوان حسگرهای زیستی

آنتوسیانین‌ها رنگدانه‌های طبیعی انحلال‌پذیر در آب هستند که در چندین گیاه و میوه وجود دارند، آنتوسیانین‌ها به عنوان فلاوونوئیدها طبقه بندی می‌شوند و ویژگی‌های آنتی اکسیدانی، ضد التهابی و ضد سرطانی آن‌ها در مقالات گزارش شده است. آنتوسیانین‌ها مسئول رنگ قرمز، بنفش و آبی انواع گیاهان و میوه‌ها هستند و نسبت به تغییرات pH بسیار واکنش نشان می‌دهند (ساختار شیمیایی آن‌ها با تغییرات pH تغییر می‌کند که منجر به رنگ‌های مختلف می‌شود) (شکل ۱). (Alfei *et al*., 2020).



شکل ۱: تغییرات در ساختار آنتوسیانین‌ها به دلیل تغییرات pH، اقتباس شده از (Roy & Rhim, 2021).

Figure 1. Changes in anthocyanins structure due to pH changes, adapted from

در پژوهشی علمی، یک فیلم هیدروژل دولایهٔ حساس به pH با استفاده از لایه‌ای ساخته شده از ژلاتین و نانوذرات ZnO و لایهٔ دوم از صمغ ژلان[1] با عصارهٔ آنتوسیانین، برای پایش فساد ماهی ساخته شد. آنتوسیانین‌ها از میوه‌های توت استخراج شدند و پاسخ آن‌ها به تغییرات pH بررسی گردید. آنتوسیانین‌ها از pH ۲ تا ۶ رنگ‌ها را از صورتی روشن به بی رنگ نشان می‌دهند و از pH ۷ تا ۱۲ رنگ خود را از زرد مایل به سبز روشن به رنگ نارنجی تغییر می‌دهند. ثبات رنگ آنتوسیانین‌ها با استفاده از نانوذرات ZnO روی لایهٔ بالایی فیلم افزایش یافت، چون به عنوان یک مانع در برابر نور UV عمل می‌کند (Sohail *et al.*, 2018).

در پژوهشی دیگر برای پایش فساد ماهی کپورچه، آن را در جعبه‌ای در دار قرار دادند و روی آن سوراخ ایجاد کردند و فیلم دولایه را به‌عنوان درپوش سوراخ قرار دادند. میزان نیتروژن فرار کل (TVB-N) و تغییرات رنگ ارزیابی و نشان داده شد که پس از ۶ روز نگهداری در یخچال، تغییرات رنگ روی فیلم رخ می‌دهد، یعنی از صورتی اولیه به سبز روشن و در نهایت به‌دلیل افزایش مقدار TVB-N به زرد می‌رسد که نشان دهندهٔ تخریب ماهی بسته بندی شده است. تغییرات رنگ روی فیلم با تولید NH3 مرتبط است که می‌تواند گروه هیدروکسیل (-OH) موجود در فیلم هیدروژل را هیدرولیز و شرایط قلیایی ایجاد کند. در این شرایط، آنتوسیانین‌ها ساختار خود را از یون فلاویلیوم[2] به ساختار کالکن تغییر می‌دهند که با تغییرات رنگ فیلم نمایان می‌شود. استفاده از نانوذرات باعث بهبود پایداری فیلم می‌شود و با خواص حسگر NH3 تداخلی ندارد. فیلم‌های تهیه شده می‌توانند به عنوان حسگر هوشمند در تشخیص فساد ماهی عمل کنند. با این حال، هیچ آزمایشی در مورد فعالیت ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی آن‌ها دیده نمی‌شود (Della Pelle & Compagnone, 2018).

استفاده از آنتوسیانین‌ها به عنوان یک حسگر pH برای پایش بر گوشت گاو و ماهی را محققان مطالعه کردند. ورقه‌های نشاستهٔ کاساوا با اضافه کردن آنتوسیانین‌ها به روش اکستروژن[3] تولید شد. پس از آن، ورقه‌های نشاستهٔ کاساوا با غلظت‌های مختلف آنتوسیانین (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) روی لولهٔ فالکون قرار داده شد و نمونه‌هایی از گوشت گاو و ماهی در لوله قرار داده شدند و

[1] Gellan gum
[2] Flavylium ion
[3] Extrusion process

به ترتیب در دمای ۶ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد (گوشت گاو و ماهی) نگهداری شدند و تغییرات به مدت ۳ روز ارزیابی شد. ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی ورقه‌های نشاستهٔ کاساوا با اضافه کردن آنتوسیانین‌ها تغییر یافت که در مقایسه با نمونه‌های نشاسته کاساوا بدون آنتوسیانین منجر به افزایش ورم، کاهش انعطاف‌پذیری و آب‌دوستی کمترشد. با شروع تخریب مواد غذایی، گاز تولید شد (به دلیل تولید TVB-N)، pH افزایش یافت و فضای بالای بسته بندی قلیایی‌تر شد. تولید گاز باعث هیدرولیز آنتوسیانین‌های موجود در ورقه‌های نشاستهٔ کاساوا شد و در نتیجه تغییر رنگ جزئی رخ داد. تغییر رنگ در صفحات نشاسته کاساوا با مقدار بیشتر آنتوسیانین، در هر دو محصول غذایی (گوشت گاو و ماهی)، شدیدتر بود، با این همه، محققان گزارش کردند که بهبود در تولید و فرمولاسیون مورد نیاز است، زیرا تغییر رنگ ضعیف می‌تواند مصرف‌کنندگان را گیج کند (Weston *et al.*, 2021).

آنتوسیانین‌های استخراج شده از کلم قرمز و گل رز نیز بررسی شدند تا به عنوان یک سنسور نشانگر pH برای ارزیابی فساد غذای گوشت عمل کنند. آنتوسیانین‌ها در یک محلول آگارز مخلوط شدند و عملکرد نمایشگر ابتدا در آزمون‌های آزمایشگاهی تحت تولید آمونیاک که فرآیند تجزیه گوشت را شبیه‌سازی می‌کند، و پس از آن در موقعیت تماس با گوشت گاومیش ارزیابی شد. معلوم شد زمانی که pH افزایش می‌یابد، تغییر رنگ از قرمز به سبز رخ می‌دهد، این تغییر رنگ نتیجهٔ تولید ترکیبات نیتروژنی فرار است که باعث تغییر ساختاری ساختار آنتوسیانین‌ها می‌شود. هر دو آزمایش، پتانسیل فیلم را برای استفاده به عنوان نمایشگر تازگی[1] نشان دادند. با این حال، هیچ تحقیقی برای دسترسی به فعالیت ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی به‌دست نیامد (Priyadarshi *et al.*, 2021).

محققانی دیگر فیلم‌های حساس به pH را بر اساس نانوالیاف کیتین و متیل سلولز با آنتوسیانین‌های استخراج شده از میوه زرشک[2] به عنوان ماده حسگر تولید کردند. فیلم‌ها به روش قالب‌گیری تولید و عصارهٔ آنتوسیانین در محلول نانوالیاف کیتین و فیلم متیل سلولز وارد شد. برای ارزیابی ظرفیت فیلم‌های حساس به pH و پاسخ آن‌ها تحت سطوح بالای آمونیاک، فیلم‌هایی روی ظرف بسته‌بندی ماهی ایجاد و به مدت ۷۲ ساعت ارزیابی شدند. یک بار دیگر، هنگامی که pH محیط به دلیل تولید آمونیاک تغییر کرد، تغییر رنگ از قرمز مایل به صورتی کم‌رنگ مشاهده شد که نشان دهندهٔ تخریب مواد غذایی است. با این حال، این فیلم‌های حساس به pH نه تنها از نظر پاسخ رنگ سنجی به تغییرات pH در هنگام مواجهه با افزایش مقدار آمونیاک، بلکه از نظر فعالیت‌های بالقوه ضد باکتری و آنتی‌اکسیدانی نیز آزمایش شدند. قابل توجه است که این یکی از ویژگی‌های مهم بسته بندی هوشمندانه است: یعنی ترکیبی از ویژگی‌های هوشمند (ناشی از تغییرات رنگ ایجاد شده توسط آنتوسیانین‌ها به عنوان واکنشی به تجزیهٔ مواد غذایی) و با خواص زیست فعال که برای نگهداری مواد غذایی مهم است. در واقع، نشان داده شد که فیلم‌ها دارای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قوی مشابه یک آنتی‌اکسیدان مصنوعی (BHT) هستند (Sani, Tavassoli, *et al.*, 2021). با این همه، این ویژگی اخیر فقط در فیلم‌ها قابل دسترسی بود و نه در محصولات غذایی. علاوه بر این، اثر آنتوسیانین‌ها بر شبکهٔ فیلم به نظر می‌رسد ویژگی‌های مکانیکی، نوری و فیزیکی-شیمیایی را بهبود می‌بخشد.

در مورد ترکیبات فرار نیتروژن‌دار، یک حسگر متشکل از یک لایه پکتین با عصارهٔ کلم قرمز غنی از آنتوسیانین ساخته شد که به عنوان یک نمایشگر گنجانده شده بود. حسگر به روش قالب‌گیری تولید شد و عصارهٔ کلم قرمز قبل

[1] Freshness indicator
[2] *Berberis vulgaris* L

از خشک شدن به فیلم اضافه شد. استفاده از نرم‌کننده‌ها برای حفظ یکپارچگی فیلم‌ها تعیین کننده بود. اثربخشی سنسور ابتدا با قراردادن فیلم در معرض چندین آمین آزمایش و از طریق طیف سنجی UV-Vis تأیید شد، زیرا آمین‌ها باعث تغییر pH می‌شوند که آنتوسیانین‌ها به شدت واکنش‌پذیر هستند و رنگ فیلم را از بنفش به نارنجی یا زرد تغییر می‌دهند (Ahari *et al*., 2022).

تحقیقاتی وسیع روی محصولات غذایی مختلف (گوشت گاو، میگو مرغ و ماهی) با اتصال فیلم به فضای خالی ظروف مختلف محصولات غذایی ارزیابی شد. تغییر رنگ مشابهی از بنفش به زرد نشان داده شد که با نتایج مشاهده شده برای تولید ترکیبات نیتروژنی فرار و افزایش رشد میکروبی مطابقت دارد. فیلم‌ها از اجزای خوراکی ساخته شده بودند و پتانسیل خود را برای استفاده به عنوان نمایشگر تازگی در بسته‌بندی‌های هوشمند نشان دادند. با این حال، در مورد فعالیت ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی آن‌ها هیچ تحقیقی نشده است (Becerril *et al*., 2021).

در تحقیق دیگر، عصاره‌های زغال‌اخته و پوست انگور قرمز در دو شبکه مختلف (کیتوزان و کربوکسی‌متیل‌سلولز) برای پایش تازگی گوشت طیور استفاده شد. افزودن عصاره-ها به شبکه‌های پلیمری بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌ها تأثیری نداشت. با توجه به ساختار متفاوت شبکه‌های پلیمری، استفاده از عصاره‌های غنی از آنتوسیانین در تماس با گوشت طیور تغییرات رنگی متفاوتی ایجاد کرد. فیلم‌ها مستقیماً روی گوشت طیور قرار داده شدند و وقتی غذا شروع به خراب شدن کرد، تغییر رنگ روی فیلم‌ها مشاهده شد که تحت تأثیر تغییر pH ناشی از تولید آمین‌ها قرار گرفت و به شرایط قلیایی تبدیل شد. فیلم‌های کربوکسی-متیل‌سلولز (CMC) رنگ خود را از بنفش به صورتی در هنگام استفاده از عصاره بلوبری و از قرمز به صورتی برای عصارهٔ هستهٔ انگور قرمز تغییر دادند. در فیلم‌های کیتوزان، تغییرات رنگ به دلیل تفاوت بین ساختارهای پلیمری و بازآرایی‌ها پس از افزودن آنتوسیانین‌ها کمتر مشهود بود که باعث شد اولین شبکهٔ پلیمری برای ترکیب عصاره و استفاده به عنوان سنسور pH در گوشت طیور مناسب‌تر باشد. در این تحقیق‌ها، فیلم‌ها تنها به خاطر مشخصهٔ هوشمندی آن ها به‌کار می روند و نه برای مشخصهٔ فعال آن‌ها (Cheng *et al*., 2022).

در پژوهشی دیگر، صمغ آرتمیزیا[1] به عنوان محلول تشکیل دهندهٔ فیلم، با افزودن کربوکسی‌متیل‌سلولز سدیم به عنوان میزبان برای عصارهٔ کلم قرمز غنی از آنتوسیانین استفاده شد. یک فیلم تهیه گردید تا به عنوان نشانگر pH و NH3 عمل کند. برای بهبود پایداری آنتوسیانین‌ها (با بار مثبت)، کربوکسی‌متیل‌سلولز به دلیل کشش آن به بارهای مثبت و منفی اضافه شد تا از خروج آنتوسیانین‌ها جلوگیری شود. عصارهٔ کلم قرمز بر ویژگی‌های مکانیکی و نوری فیلم‌ها تأثیر گذاشت. در تماس با محلول‌های بافر مختلف، رنگ لایه‌ها از رنگ رز- بنگال به رنگ آکوامارین تغییر کرد و ثابت شد که به عنوان یک حسگر برای تغییرات pH عمل می‌کند. علاوه بر این، پاسخ NH3 با تغییر رنگ بارزتر مشاهده شد (Pirsa *et al*., 2022).

تازگی شیر و میگو از طریق یک فیلم نشانگر سنسور pH ساخته شده ازک-کاراگینان[2] وگیاه گرگ تیغه[3] همراه عصاره غنی از آنتوسیانین ارزیابی شد. غلظت‌های مختلف عصاره (۱.۵، ۲.۵، ۳.۵، ۴.۵ درصد وزنی) استفاده و مشخص شد که افزایش غلظت عصاره بر ساختار فیلم، ویژگی‌های نوری، مکانیکی و مانع نور تأثیر منفی می‌گذارد، بنابراین، تنها فیلم با ۲.۵ درصد وزنی عصاره برای پایش بر تازگی شیر و میگو استفاده شد. هنگامی که فیلم پس از ۴۸ ساعت در تماس غیرمستقیم با شیر بود، تغییر رنگ از خاکستری

[1] *Artemisia sphaerocephala* Krasch
[2] κ—carrageenan
[3] *Lycium ruthenicum* Murr

به صورتی تیره مشاهده شد (فیلم در بالای ظرف شیر قرار داده شد). تغییر رنگ به دلیل کاهش pH شیر، ناشی از تولید اسید لاکتیک رخ داد. از سوی دیگر، تغییر در pH از شرایط اسیدی به قلیایی ناشی از آمین‌های فرار تولید شده توسط میگو، فیلم‌ها را در ۷۲ ساعت از خاکستری روشن به زرد تبدیل کرد. علاوه بر آن، نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از غلظت‌های پایین‌تر عصاره برای استفاده در تولید فیلم مناسب‌تر است و اثر کمتری بر ساختار فیلم دارد. علاوه بر پاسخ رنگ‌سنجی به تغییرات pH، فیلم‌ها همچنین فعالیت آنتی اکسیدانی خوبی نشان دادند که آن‌ها را برای استفاده در بسته‌بندی هوشمندانه مناسب می‌کرد. با این حال، در این مطالعه به عملکرد فعال بسته‌بندی به طور مستقیم روی مواد غذایی پرداخته نشده است (Weston *et al.*, 2020).

در بررسی دیگر، برای ایجاد فیلم حساس به pH ساخته شده از نشاسته و ژلاتین، از آنتوسیانین‌های تربچه قرمز استفاده شد. عصاره غنی از آنتوسیانین پس از قالب‌گیری روی فیلم قرار گرفت و زمانی که فیلم‌ها در معرض محلول‌های مختلف قرار می‌گرفتند، پاسخ رنگی را در محدوده pH بین ۲ تا ۱۲ و خواص مکانیکی خوبی را نشان دادند. فیلم‌ها به بالای ظروف پتری چسبانده شدند تا در خلال نگهداری با گوشت طیور و محیط میگو تماس داشته باشند (صفر، ۳، و۳۰ درجه سانتی‌گراد). در هر دما و برای هر دو محصول غذایی، فیلم‌ها رنگ خود را از قرمز به خاکستری- بنفش تغییر دادند، دلیل آن تولید ترکیبات نیتروژنی فرار بود که باعث دی پروتوناسیون آنتوسیانین‌ها[1] می‌شود. استفاده از دو پلیمر زیستی که با آنتوسیانین‌ها برهمکنش می‌کنند، از انتشار رنگدانه در آب جلوگیری می‌کند. دمای ذخیره‌سازی عاملی مهم برای پایداری آنتوسیانین‌هاست(Roy & Rhim, 2021).

محققان دریافتند عصاره پوست جامبولان (آلو جاوا) منبعی از آنتوسیانین است که به عنوان ماده‌ای حسگر برای ایجاد فیلم‌های واکنش‌پذیر pH استفاده می‌شود. جامبولان میوه‌ای با ارزش اقتصادی پایین و بسیار فاسد شدنی است، بنابراین ارزش‌گذاری پوست‌ها برای بازیابی آنتوسیانین‌ها برای استفاده در بسته‌بندی، ارزش این محصول خاص را افزایش می‌دهد. عصاره‌ها با استفاده از متیل سلولز به عنوان شبکه برای ساخت فیلم از طریق روش قالب‌گیری در غلظت‌های مختلف (درصد حجمی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) اضافه شدند. فیلم‌ها هنگامی که در معرض محلول‌های بافر مختلف (محدوده pH ۱ تا ۱۰) قرار گرفتند، همه پاسخ رنگ سنجی را نشان دادند و رنگ خود را از قرمز و صورتی (شرایط اسیدی) به بنفش و آبی (شرایط قلیایی) تغییر دادند. عصارهٔ میوه جامبولان ویژگی‌های مکانیکی و مانع نوری فیلم‌ها را بهبود بخشید و افزایش فعالیت آنتی-اکسیدانی را نشان داد. بنابراین، فیلم‌ها به دلیل توانایی‌شان در ارائه پاسخ رنگ سنجی و همچنین نشان دادن توانایی آنتی اکسیدانی، هر دو با عمل آنتوسیانین، برای بسته بندی هوشمندانه مناسب هستند (Reshmy *et al.*, 2021).

محققان در فیلم‌های مبتنی بر کیتوزان با نانوذرات TiO2 برای توسعهٔ بسته بندی هوشمند از عصارهٔ تفاله سیب قرمز استفاده کردند. تفاله سیب قرمز سرشار از آنتوسیانین است و با درصد وزنی ۵ درصد با روش قالب‌گیری[2] به‌کار گرفته شد. از TiO2 برای بهبود پایداری و ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌ها استفاده شد. فیلم‌ها در بالای پتری دیش حاوی ماهی قزل آلا قرار داده‌شدند و پاسخ pH رنگ سنجی آن‌ها طی ۴۸ ساعت ارزیابی شد. زمانی که عصاره‌ها در معرض محلول‌های بافر مختلف قرار گرفتند، فیلم‌ها رنگ خود را از قرمز به صورتی روشن تغییر دادند که به دلیل تغییرات pH از ۶ تا ۸ بود. استفادهٔ هم‌زمان از نانوذرات و آنتوسیانین‌ها

[1] Deprotonation of anthocyanins
[2] Casting method

نه تنها ویژگی‌های مکانیکی را بهبود بخشید و منجر به ایجاد فیلمی با ویژگی‌های حسگر pH شد، بلکه فیلم‌ها را قادر ساخت تا ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و ضد باکتریایی قوی با کاربرد بالقوه در آینده در بسته‌بندی‌های هوشمندانه داشته باشند (Poyatos-Racionero *et al.*, 2018).

در تحقیق دیگر، برنج سیاه که منبع آنتوسیانین است به عنوان مادۀ حسگر مورد استفاده در شبکه‌ای متشکل از نانوکریستال‌های کیتین اکسید شده و کیتوزان برای ایجاد لایه‌ها به‌کار گرفته شد. فیلم به روش قالب گیری تهیه و عصارۀ آنتوسیانین‌ها در غلظت‌های صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی اضافه شد. برای ارزیابی واکنش آن به عنوان حسگر pH، فیلم‌ها روی سطح میگو و ماهی پرومفت قرار داده شد. یک تغییر رنگ روی فیلم‌ها با غلظت آنتوسیانین‌های ۳ و ۵ درصد وزنی در هنگام قرار گرفتن در معرض غذا مشاهده شد که از رنگ بنفش اولیه به ترتیب به خاکستری-آبی و قهوه‌ای تبدیل شدند.کل نیتروژن بازی فرار افزایش یافت و همسو با تغییرات رنگ، نشان دهندۀ فساد مواد غذایی برای هر دو نمونه غذا بود. علاوه بر این، فیلم‌ها ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قوی را نشان می‌دهند که پتانسیل امیدوارکننده‌ای برای استفاده به عنوان بسته‌بندی هوشمندانه مواد غذایی است. شایان ذکر است که به‌رغم پیشرفت‌های بیشتر بر اساس ساخت فیلم‌هایی با خاصیت حسگری و ایجاد تغییر رنگ، مواد دیگری نیز با همین هدف در حال توسعه هستند (Mustafa & Andreescu, 2020).

با توجه به این موضوع، تلاش شد یک نشانگر pH فوم متخلخل[1]با استفاده از پلی وینیل الکل، پلی‌وینیل پیرولیدون و تقویت شده با سلولز میکروکریستالی با استفاده از آنتوسیانین‌های کلم قرمز به عنوان ماده حسگر ساخته شود. در این کار، یک فوم متخلخل با استفاده از خشک‌کن انجمادی[2] ایجاد شد و مواد حاصل روی عصارۀ آنتوسیانین غوطه ورگردید. مادۀ به دست‌آمده روی میگو و مرغ آزمایش شد تا توانایی آن در عملکرد به عنوان نشانگر pH ارزیابی شود. نشانگر، هم برای میگو و هم برای مرغ، رنگ بنفش اولیه را نشان داد که پس از ۳ روز نگهداری به خاکستری مایل به سبز تبدیل شد. تغییرات رنگ به دنبال تغییر pH محیط بود که در ابتدا اسیدی به بازی گرویدکه پتانسیل فوم‌ها را برای استفاده در بسته‌بندی‌های هوشمند به عنوان نشانگر رنگ سنجی pH برای فساد مواد غذایی نشان داد (Ahari & Soufiani, 2021).

به طور کلی، رنگدانه‌های طبیعی آنتوسیانین‌ها با ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی و حساسیت به pH ، برای ساخت حسگر زیستی برای سیستم‌های بسته بندی هوشمندانه مناسب هستند. با این حال، تضمین پایداری آن‌ها برای استفاده به عنوان نمایشگر بسیار مهم است. آنتوسیانین‌ها به تغییرات دما بسیار حساس هستند که باعث از بین رفتن اثربخشی محصول می‌شود و بنابراین حفظ پایداری آن‌ها بسیار مهم است. دماهای بالا منجر به تجزیۀ آنتوسیانین‌ها می‌شود و در نتیجه آن‌ها قهوه‌ای می‌شوند، بنابراین، دمای پایین‌تر برای حفظ پایداری آن‌ها مطلوب‌تر است. اکسیژن و نور نیز به تخریب آنتوسیانین‌ها کمک می‌کنند. برای غلبه بر این محدودیت می‌توان فیلم‌های دولایه‌ای تولید کرد که در آن آنتوسیانین‌ها را در لایه داخلی، در تماس با غذا، ترکیب کرد و ترکیباتی مانند ZnO را به لایه بیرونی شبکه اضافه کرد تا با تخریب ناشی از نور مقابله کند. برای ایجاد فیلم عملی با خواص حسگر، استفاده از پلیمر زیستی مناسب به عنوان شبکه پلیمری برای ترکیب رنگدانه‌های طبیعی بسیار مهم است. واکنش‌های پلیمر زیستی با ماده حسگر باعث بازآرایی[3] در شبکۀ نهایی و باعث تغییرات ساختاری آنتوسیانین‌ها می‌شود که بر رنگ نهایی لایه‌ها تأثیر می‌گذارد. رنگ لایه‌های غنی شده با

[1] Porous foam
[2] Freeze dryer
[3] Rearrangement

آنتوسیانین‌ها نیز به ماهیت بیوپلیمرها بستگی دارد، بیوپلیمرهای خنثی مانند نشاسته و صمغ تارا که از طریق پیوندهای هیدروژنی با رنگدانه برهمکنش می‌کنند ترجیح دارد که بنابراین تداخل کم بر رنگ رنگدانه‌ها دارد (de Oliveira Filho *et al*., 2021).

علاوه بر این، منشأ رنگدانه‌های طبیعی برای ایجاد رنگ قابل مشاهده برای فیلم و تغییر رنگ ناشی از تغییرات محصول غذایی مهم است، زیرا آنتوسیانین‌ها با منشأهای مختلف، رنگ‌ها و ساختارهای شیمیایی متفاوتی دارند. علاوه بر این، غلظت آنتوسیانین‌های ترکیب شده برای تولید فیلم موفق تعیین کننده است. مقدار بیش‌ازحد می‌تواند ساختار شبکهٔ فیلم ناشی از تجمع آنتوسیانین‌ها را مختل کند. درمورد رنگدانه‌های حسگر، برخی مطالعات نشان می‌دهند که تثبیت آن‌ها در پلیمر مهم است، زیرا از مهاجرت آن به محصولات غذایی جلوگیری می‌کند تا فعالیت حسگر آن حفظ شود (Singh *et al*., 2018).

محققان اضافه کردن ترکیبات آبگریز به شبکه فیلم را برای جلوگیری از مهاجرت نامطلوب به محصولات غذایی پیشنهاد می‌کنند. اگرچه تثبیت رنگدانه‌ها در شبکهٔ پلیمری فعالیت آنتی‌اکسیدانی یا ضد میکروبی آن را محدود می‌کند، ، اما می‌توانند به عنوان جاذب یا پاکسازی کننده عمل‌کنند یا می‌توانند مستقیماً بر ناحیه‌ای از غذا عمل کنند که در تماس با پلیمر است. علاوه بر این، خواص مکانیکی فیلم‌ها را می‌توان به دلیل ترکیب آنتوسیانین‌ها تغییر داد، و ترکیبی متعادل از تقویت کننده‌ها و نرم کننده‌ها همراه با رنگدانه ها می‌تواند به حفظ یا افزایش کارایی بسته‌بندی مواد غذایی کمک کند. ترکیب آنتوسیانین‌ها در فیلم زیست تخریب‌پذیر جایگزین امیدوارکننده‌ای برای نشانگرها و حسگرهایی است که با استفاده از منابع تجزیه‌ناپذیر تولید می شوند (Sani, Tavassoli, *et al*., 2021).

استفاده از بتالین‌ها به عنوان حسگرهای زیستی

بتالین‌ها رنگدانه‌های حاوی نیتروژن انحلال‌پذیر در آب هستند که در واکوئل‌های بافت برخی گیاهان قرار دارند. بتالین‌ها ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را نشان می‌دهند که به عنوان پاکسازی کنندهٔ رادیکال عمل می‌کنند و اثر مثبتی در مهار پراکسیداسیون لیپیدی و تجزیهٔ کوفاکتور هم در غلظت بسیار کم نشان می‌دهند. پیش‌ساز بیوسنتزی بتالین‌ها اسید بتلامیک[1] است و به نظر می‌رسد این رنگدانه‌ها در pH بین ۳ تا ۸ پایدار هستند (Priyadarshi *et al*., 2021).

محققان فیلم‌های کیتوزان آمونیوم چهارتایی و پلی وینیل الکل (QAC-PVA)[2] را با ترکیب عصارهٔ گلابی کاکتوس غنی از بتالین (CPE)[3] توسعه دادند تا به عنوان نمایشگر تازگی کیفیت میگوی تازه عمل کند. بتالین‌ها در شرایط قلیایی حساس هستند ($PH \geq 8$) و با تغییر pH ، از قرمز-بنفش به زرد-نارنجی تبدیل می‌شوند. CPE به مخلوط QAC-PVA اضافه و سپس خشک شد. برای ارزیابی فعالیت ظرف میگو، فیلم‌هایی به فضای بالای ظرف وارد شد. افزودن CPE (۲ و ۳ درصد وزنی) باعث ایجاد تغییرات رنگی در لایه‌ها شد و زمانی‌که تازگی میگو در ۲۴ ساعت کاهش یافت، از رنگ بنفش اصلی به نارنجی تغییرکرد.

علاوه براین، افزودن CPE به فیلم‌ها مانع عبور نور UV-Vis می شود و خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی را افزایش می‌دهد. فیلم‌ها به دلیل ویژگی‌های هوشمند و فعالشان، پتانسیل استفاده در بسته‌بندی هوشمندانه را نشان دادند، اگرچه فعالیت آن فقط روی فیلم‌ها و نه روی مواد غذایی ارزیابی شد (de Oliveira Filho *et al*., 2021).

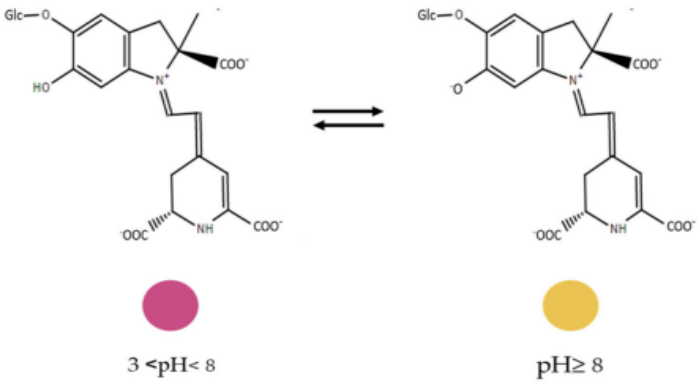
[1] Betalamic acid
[2] quaternary ammonium chitosan and polyvinyl alcohol films (QAC-PVA)
[3] cactus pears extract (CPE)

سنسور pH دیگری برای تشخیص آمونیاک با استفاده از گل تاج خروس به عنوان منبع بتالین و ترکیبی از کیتوزان آمونیوم چهارتایی و ژلاتین ماهی برای تشکیل یک فیلم و ارزیابی تازگی میگو گزارش شده است. بتالین‌ها از گل تاج خروس استخراج و در غلظت‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) در محلول فیلم اضافه شدند. فیلم‌ها روی پوشش داخلی ظرف میگو قرار گرفتند و تغییر رنگ از صورتی به زرد مشاهده شد که به دلیل واکنش بتالین به تغییرات pH ناشی از افزایش ترکیبات نیتروژن فرار است. با بررسی خواص فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها نشان داده شد استفاده از عصارهٔ گل تاج خروس بیشتر آن‌ها را افزایش می‌دهد و نیز نشان داده شد که افزایش غلظت بتالین‌ها ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی فیلم‌ها را بهبود می‌بخشد. این فیلم‌ها نتایج امیدوارکننده‌ای را برای استفاده در بسته‌بندی هوشمندانه نشان دادند (Neethirajan *et al.*, 2018).

محققان پلی وینیل الکل و فیلم‌های نشاسته ای (۲:۱ پلی وینیل الکل : نشاسته) را با بتالین‌های استخراج شده از پوست پیتایای قرمز[1] ترکیب کردند. بتالین‌ها استخراج و در محلول فیلم در غلظت‌های مختلف (۰.۲۵، ۰.۵، ۱ درصد وزنی نشاسته) قرار گرفتند. گنجاندن عصاره‌های بتالین خواص مکانیکی، بخار آب و سد نوری فیلم را در مقایسه با فیلم‌های کنترل پلیمرهای اولیه بهبود بخشید. فیلم‌های حاوی عصارهٔ غنی از بتالین در قسمت درپوش پتری دیش حاوی میگوهای تازه قرار داده شدند تا تازگی آن‌ها را در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۸ ساعت آزمایش کنند. در ابتدا، فیلم‌ها دارای رنگ صورتی بودند که این رنگ به مدت ۲۴ ساعت حفظ شد، اما پس از آن، آن‌ها به زرد تبدیل شدند و کاربرد هوشمند آن را نشان دادند. ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی فیلم‌ها نیز بررسی و نشان داده شد افزودن این رنگدانه عملکردها را بهبود می‌بخشد. فیلم‌هایی با ۱ درصد عصارهٔ غنی از بتالین امیدوارکننده‌ترین مورد استفاده به عنوان نمایشگر تازگی بودند و به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی، پتانسیل استفاده در سیستم‌های بسته‌بندی هوشمندانه را نشان دادند (Zhao *et al.*, 2022).

محققان دیگر فیلم‌های فعال و هوشمند ساخته شده از ژلاتین و پلی وینیل الکل را با ترکیب عصارهٔ برگ تاج خروس غنی از بتالین توسعه دادند. عصاره‌در محلول تشکیل دهنده فیلم ادغام شد. افزودن عصاره ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها را افزایش داد. به دنبال تخریب مرغ و ماهی، فیلم‌ها رنگ خود را از قرمز به زرد تغییر دادند. این تغییر رنگ، مطابق بود با مقدار TVB-N، pH، کیفیت میکروبیولوژیکی و فاسد شدن اکسیداتیو ارزیابی شده روی محصولات غذایی. این فیلم‌ها پتانسیل استفاده به عنوان بسته‌بندی هوشمندانه را نشان دادند. پایداری بتالین‌ها تحت تأثیر عوامل بیرونی شامل اکسیژن، دما و نور است. برای به دست آوردن حداکثر پتانسیل به عنوان یک نمایشگر رنگ سنجی، حفظ عملکرد رنگدانه مهم است. غلظت رنگدانه‌های مورد استفاده باید به دقت ارزیابی شود، وگر نه آن‌ها می‌توانند خواص مکانیکی و فیزیکی فیلم‌ها را به دلیل تجمع رنگدانه ها در صورت استفادهٔ بیش از حد تحت تأثیر قرار دهند. بتالین‌ها زمانی که در فیلم‌ها افزوده می شوند تمایل به بهبود خواص فیزیکی، مانع نوری و آنتی‌اکسیدانی خود دارند. کدورت یکی از پارامترهایی است که با افزودن این نوع رنگدانه‌ها به عنوان یک مانع نوری تحت تأثیر مثبت قرار می‌گیرد، بنابراین ممکن است از تخریب اکسیداتیو مواد غذایی جلوگیری کند. از آنجایی که بتالین‌ها نسبت به آنتوسیانین‌ها در pH پایدارتر هستند، استفاده از آن‌ها در بسته بندی هوشمندانه جایگزین بسیار امیدوارکننده‌ای است (شکل ۲) (Neethirajan *et al.*, 2018).

[1] Red pitaya peel



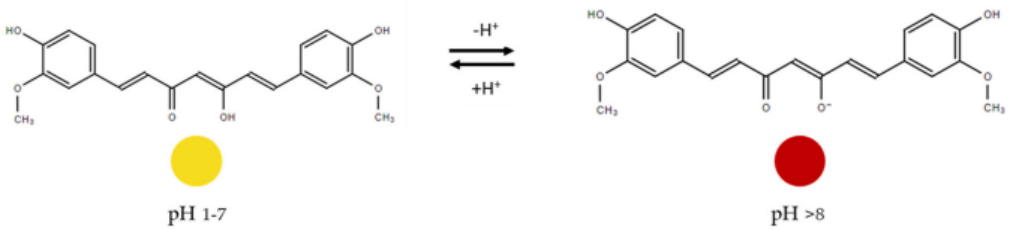
شکل ۲: تغییر در ساختار بتالین‌ها به دلیل تغییرات pH

Figure 2. Changes in betalains structure due to pH changes, adapted from

استفاده از کورکومین به عنوان حسگر زیستی

کورکومین یک پلی فنل است که از ریشهٔ زردچوبه استخراج می‌شود، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی، ضد التهابی را نشان می‌دهد و رنگ زرد-نارنجی قوی دارد.کورکومین در pH برابر ۱ تا ۷، رنگ زرد دارد و از pH بالاتر از ۸ به‌رنگ قرمز-نارنجی تغییر می‌کند (شکل ۳) (Weston *et al.*, 2020).

کورکومین به عنوان ماده‌ای حسگر برای ایجاد یک لایه با صمغ تارا و پلی وینیل الکل استفاده شد. غلظت‌های مختلف (۰.۱، ۰.۳، ۰.۵درصد وزنی) کورکومین به فیلم اضافه شد. برای ارزیابی توانایی حسی[1] فیلم‌ها برای عمل به عنوان بسته بندی هوشمند، فیلم‌ها در داخل پتری دیش حاوی میگو تازه قرار داده شدند و تغییرات رنگ در دمای محیط بررسی شد. در ابتدا، فیلم‌ها رنگ زرد را نشان می‌دادند و در پایان آزمایش رنگ نارنجی-قرمز را نشان می‌دادند. دلیل تغییرات pH میگوها، تخریب آن‌ها و در نتیجه افزایش کل نیتروژن فرار از طریق تولید آمونیاک بود. خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی در این مطالعه ارزیابی نشد. این فیلم پتانسیل استفاده از کورکومین در بسته بندی هوشمند را نشان‌داد.



شکل ۳- تغییرات در ساختار کورکومین به دلیل تغییرات pH (Franco *et al.*, 2021).

Figure 3. Changes in curcumin structure due to pH changes, adapted from

در مطالعه‌ای دیگر، لایه‌های آگار-PVA با کورکومین تغییر رنگی از زرد به نارنجی-قرمز را زمانی ایجاد کرد که تازگی میگو کاهش یافت. به این ترتیب که فیلم‌های هیدروژل به روش قالب گیری با حل کردن کورکومین (صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی بر وزن) روی محلول مخلوط آگار و پلی‌وینیل الکل تهیه شد. حساسیت آمونیاک لایه‌های

[1] Sensing ability

کورکومین تنها با استفاده از فیلم کورکومین درصد وزنی۲ درصد با قرار دادن آن در داخل ظرف میگو ارزیابی شد. در حضور آمونیاک، pH افزایش می‌یابد و فیلم‌ها می‌توانند رنگ خود را تغییر دهند، که نشان دهندۀ تخریب میگو است، بنابراین، پتانسیل استفاده به عنوان یک نمایشگر در بسته‌بندی هوشمند را نشان می‌دهد (Lu *et al*., 2019).

محققان فیلم‌های مبتنی بر پکتین را همراه با نانوذرات کورکومین و گوگرد برای تولید فیلمی برای پایش تازگی میگو در طول ذخیره‌سازی به‌کار گرفتند. فیلم‌ها به روش قالب گیری تهیه شدند. افزودن نانوذرات کورکومین و گوگرد باعث بهبود پایداری حرارتی و ویژگی‌های ممانعت در برابر UV شد. فیلم‌ها روی پوشش ظرف میگو قرار داده شدند و به مدت ۳۶ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردیدند تا پاسخ رنگ‌سنجی به تغییرات pH ارزیابی شود. فیلم‌ها از زرد به نارنجی تغییر کردند. این تغییر رنگ ناشی از تغییرات pH به دلیل تولید ترکیبات نیتروژن فرار است که تخریب میگو را آشکار می‌کند و بنابراین، پتانسیل استفاده به عنوان بسته بندی هوشمند را نشان می‌دهد. علاوه بر این، فیلم‌ها ویژگی‌های ضد باکتریایی و آنتی اکسیدانی قوی را نشان دادند تا به عنوان بسته‌بندی فعال استفاده شوند. با این حال، تأثیر آن پارامترها مستقیماً روی محصولات غذایی قابل دسترسی نبود. این راه‌حل کاربرد بالقوه‌ای را در بسته بندی هوشمندانه نشان داد (Zhai *et al*., 2022).

در پژوهشی دیگر، صمغ دانۀ کورکومین و لالامانتیا ایبریکا[1]، به عنوان شبکه برای ایجاد لایه‌هایی برای پایش بر تازگی میگو استفاده شد. فیلم‌ها به روش قالب‌گیری با استفاده از توئین ۸۰ به عنوان امولسیفایر[2] تهیه شدند. هنگامی که کورکومین اضافه شد، فیلم‌ها بهبودی را در سد بخار آب و همچنین خواص مکانیکی نشان دادند. میگوها با فیلم پوشانده و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از ۵ روز رنگ آن‌ها از زرد اولیه به قرمز تغییر یافت. این نتایج به دنبال افزایش TVB-N اندازه‌گیری شده روی میگوها بود که منجر به تغییر pH شد و باعث تغییر رنگ گردید. علاوه بر این، فیلم‌های حاوی کورکومین دارای خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی هستند، بنابراین پتانسیل استفاده به عنوان بسته‌بندی فعال را نشان می‌دهند. با این حال، این اثرها مستقیماً روی حفظ محصولات غذایی آزمایش نشدند. به طور کلی، این فیلم را می‌توان در بسته‌بندی هوشمندانه، یا برای پایش و به تاخیر انداختن تخریب غذاهای دریایی اعمال کرد.

کورکومین دارای فعالیت ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی است و این پتانسیل را دارد که به عنوان عاملی فعال برای افزایش عمر ماندگاری برخی محصولات غذایی شرکت کند. کورکومین هنگامی که به فیلم‌ها اضافه می‌شود، خواص مکانیکی آن‌ها (حداقل با مقادیری که مورد مطالعه قرار گرفته است) تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و ماهیت آبگریز آن به افزایش خواص آبگریزی فیلم کمک می‌کند. علاوه بر این، پایداری حرارتی کورکومین ممکن است پایداری فیلم را بهبود بخشد. ترکیبی از خواص فعال آن با خواص نشانگری آن (تغییر رنگ با تغییر pH) به وضوح پتانسیل بزرگ استفاده از کورکومین را روی فیلم‌ها به عنوان حسگر زیستی برای بسته بندی هوشمندانه نشان می‌دهد (Neethirajan *et al*., 2018).

دیگر رنگدانه‌های طبیعی به عنوان حسگرهای زیستی

دیگر رنگدانه‌های طبیعی نیز برای استفاده به‌عنوان حسگر در بسته‌بندی مواد غذایی بررسی شده‌اند. نفتوکینون‌ها رنگدانه‌هایی هستند که به محیط‌های اسیدی و بازی حساس‌اند و بنابراین می‌توانند به عنوان نشانگر به‌کار

[1] *Lallemantia iberica*
[2] Emulsifier

می‌روند. علاوه بر این، نفتوکینون‌ها همچنین می‌توانند مقاومت در برابر رطوبت فیلم‌ها را به دلیل خاصیت آبگریز خود بهبود بخشند (Balbinot-Alfaro *et al*., 2019).

در پژوهشی، رنگ نفتوکینون و سلولز استخراج شده از آرنبیا اوکروما[1] برای ایجاد نشانگر pH در فساد مواد غذایی استفاده شد. از خمیر سلولزی برای ساخت یک فیلم مبتنی بر سلولز استفاده گردید و محلول رنگی نفتوکینون با آغشته کردن به‌فیلم وارد شد. فیلم‌ها در فضای درپوش پتری دیش حاوی نمونه‌های گوشت خوک و میگو قرار داده شد. افزایش کل نیتروژن بازی فرار، به عنوان یک نشانگر مهم برای فساد مواد غذایی و به دنبال آن یک تغییر pH، باعث واکنش رنگ‌سنجی لایه‌ها شد. فیلم‌ها در محدودهٔ pH از ۵ تا ۱۲ پاسخ نشان دادند. تغییر رنگ از رز-قرمز (تازه) به بنفش (فاسد شدن ملایم) و در نهایت به آبی-بنفش (فاسد شدن کل)، نشان‌دهندهٔ مراحل مختلف فساد مواد غذایی برای هر دو محصول است (Lu *et al*., 2019).

در آزمایش دیگر، یک حسگر pH مشابه بر اساس نفتوکینون (شیکونین) و سلولز ساخته شد و روش مشابهی مطابق آزمایش بالا برای توسعهٔ فیلم حسگر رنگ استفاده گردید. شیکونین، رنگدانهٔ نفتوکینون قرمز از ریشهٔ گرومول (لیتوسپرموم اریتروریزون) استخراج شد تا به عنوان حسگر رنگ استفاده شود. استفاده از فیلم روی بسته‌های ماهی و گوشت خوک نتیجه‌ای مشابه نشان داد و تغییر رنگ از قرمز به آبی را به عنوان نتیجه افزایش pH در محیط به دلیل تولید TVB-N نشان داد. محققان با دسترسی به فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیلم‌های تولید شده نشان دادند که شیکونین این پارامتر را روی کاغذ افزایش می‌دهد و پتانسیل آن را برای استفاده نه تنها به عنوان بسته‌بندی هوشمند، بلکه به عنوان بسته‌بندی فعال نشان می‌دهد. در این راستا، آزمایش‌های مربوط به آن فعالیت روی مواد غذایی باید دنبال شود تا معلوم گردد آیا اثرهای مفید بر افزایش ماندگاری وجود دارد یا نه (Zhai *et al*., 2022).

نتیجه گیری

بسته‌بندی مواد غذایی عامل مهمی برای حفظ کیفیت محصولات غذایی است. استفاده از بسته‌بندی هوشمند مسیری نو برای ارائهٔ اطلاعات دقیق‌تر نه تنها برای تامین‌کنندگان بلکه مهم‌تر از همه برای مصرف‌کنندگان است. در واقع، این سیستم‌های بسته‌بندی جدید می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که کیفیت محصولات بسته‌بندی شده را اطلاع دهند و امکان تشخیص درجهٔ تخریب مواد غذایی را از نظر ایمنی و کیفیت مواد غذایی فراهم آورند. بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی منجر به توسعهٔ سیستم‌های بسته بندی جدید و مبتنی بر مواد زیست فعال می‌شوند. در این مقالهٔ مروری، تمرکز بر نشانگرهای تازه‌گی زیستی بر پایهٔ عصاره‌های طبیعی است که برای تشخیص درجهٔ تازه-گی محصولات فاسد شدنی مانند گوشت، ماهی و غذاهای دریایی استفاده می‌شوند.

رنگدانه‌های آنتوسیانین، کورکومین و بتالین‌ها که عموماً از میوه‌ها و گیاهان و ضایعات آن‌ها استخراج می‌شوند، مطالعه‌شده‌ترین گزینه‌ها برای توسعهٔ حسگرهای زیستی بوده‌اند. این رنگدانه‌ها همچنین دارای خواص ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی هستند و هنگامی که با بسته بندی ادغام شوند می‌توانند به افزایش ماندگاری محصولات بسته بندی شده کمک کنند. بنابراین، حسگرهای زیستی کاربردی بالقوه در سیستم‌های بسته بندی هوشمندانهٔ مواد غذایی دارند. به‌رغم تأثیر مثبت آن‌ها برای استفاده به عنوان سنسور pH، این رنگدانه‌ها نسبت به دما، O2 و نور ناپایداری نشان می‌دهند. بنابراین برای بهبود کارایی و پایداری نشانگرها در شبکهٔ پلیمری به‌مطالعات بیشتری نیاز خواهد

[1] *Arnebia euchroma*

بود. کپسوله‌کردن رنگدانه‌ها می‌تواند پایداری رنگدانه‌ها را حفظ کند. استفاده از نانوذرات، مانند نانوذرات ZnO، به عنوان عوامل مسدود کنندهٔ نور UV نیز مکانیسم موثری برای محافظت و تثبیت رنگدانه‌هاست. استفاده از دولایه نیز راهکاری است که می‌تواند به تثبیت رنگدانه‌ها کمک کند.

همچنین مطالعهٔ ترکیبی از این رنگدانه‌ها با دیگر ترکیبات فعال مانند اسانس‌هایی که می‌توان از انواع گیاهان معطر یا محصولات صنعتی به‌دست آورد در بیوکامپوزیت‌ها و آزمایش آن‌ها در منشأ اصلی غذایی، به منظور درک پتانسیل آن به عنوان بسته‌بندی هوشمندانه برای مواد غذایی خاص جالب خواهد بود. استفاده از پلیمرهای زیستی و رنگدانه‌های طبیعی برای سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی هنوز برخی محدودیت‌ها را نشان می‌دهد و به‌مطالعات بیشتری برای درک بهتر نحوهٔ تعامل حسگرهای زیستی با محصولات غذایی نیاز خواهد بود. بیشتر نشانگرهای توسعه یافته اگر چه مستقیماً با محصول غذایی تماس ندارند، اما مطالعات سم‌شناسی بیشتر ضروری خواهد بود. علاوه بر آن، یکی از محدودیت‌های مهم برای تجاری سازی محصولات، افزایش هزینهٔ بسته‌بندی است. بنابراین، برای گسترش استفاده از بسته‌بندی هوشمند در آینده، تولید حسگرهای بسیار حساس، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

منابع

Abedi-Firoozjah, R., Yousefi, S., Heydari, M., Seyedfatehi, F., Jafarzadeh, S., Mohammadi, R., Rouhi, M., & Garavand, F. (2022). Application of red cabbage anthocyanins as pH-sensitive pigments in smart food packaging and sensors. *Polymers*, *14*(8), 1629 .

Ahari, H., Golestan, L., Anvar, S. A. A., Cacciotti, I., Garavand, F., Rezaei, A., Sani, M. A., & Jafari, S. M. (2022). Bio-nanocomposites as food packaging materials; the main production techniques and analytical parameters. *Advances in Colloid and Interface Science*, *310*, 102806 .

Ahari, H., & Soufiani, S. P. (2021). Smart and active food packaging: Insights in novel food packaging. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 657233 .

Alfei, S., Marengo, B., & Zuccari, G. (2020). Nanotechnology application in food packaging: A plethora of opportunities versus pending risks assessment and public concerns. *Food Research International*, *137*, 109664 .

Amin, U., Khan, M. K. I., Maan, A. A., Nazir, A., Riaz, S., Khan, M. U., Sultan, M., Munekata, P. E., & Lorenzo, J. M. (20 .(22Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packaging and Shelf Life*, *33*, 100903 .

Arroyo, B. J., Santos, A. P., de Melo, E. d. A., Campos, A., Lins, L., & Boyano-Orozco, L. C. (2019). Bioactive compounds and their potential use as ingredients for food and its application in food packaging. In *Bioactive compounds* (pp. 143-156). Elsevier .

Balbinot-Alfaro, E., Craveiro, D. V., Lima, K. O., Costa, H. L. G., Lopes, D. R., & Prentice, C. (2019). Intelligent packaging with pH indicator potential. *Food engineering reviews*, *11*, 235-244 .

Becerril, R., Nerín, C., & Silva, F. (2021). Bring some colour to your package: Freshness indicators based on anthocyanin extracts. *Trends in Food Science & Technology*, *111* .495-505 ,

Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *105*, 385-401 .

Chaudhary ,V., Punia Bangar, S., Thakur, N., & Trif, M. (2022). Recent advancements in smart biogenic packaging: Reshaping the future of the food packaging industry. *Polymers*, *14*(4), 829 .

Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M & ,.Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, *375*, 131738 .

de Oliveira Filho, J. G., Braga, A. R. C., de Oliveira, B. R., Gomes, F. P., Moreira, V. L., Pereira, V. A .C., & Egea, M. B. (2021). The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. *Food Research International*, *142*, 110202 .

Della Pelle, F., & Compagnone, D. (2018). Nanomaterial-based sensing and biosensing of phenolic compounds and related antioxidant capacity in food. *Sensors*, *18*(2), 462 .

Dodero, A., Escher, A., Bertucci, S., Castellano, M., & Lova, P. (2021). Intelligent packaging for real-time monitoring of food-quality: Current and future developments. *Applied Sciences*, *11*(8), 3532 .

Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, *9*(11), 1628 .

Dudnyk, I., Janeček, E.-R., Vaucher-Joset, J., & Stellacci ,F. (2018). Edible sensors for meat and seafood freshness. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *259*, 1108-1112 .

Fernandez, C. M., Alves, J., Gaspar, P. D., Lima, T. M., & Silva, P. D. (2023). Innovative processes in smart packaging. A systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(3), 986-1003 .

Franco, M., Da Cunha, L., & Bianchi, R. F. (2021). Janus principle applied to food safety: An active two-faced indicator label for tracking meat freshness. *Sensors and Actuators B: Chemical* .129466 ,333 ,

Ghasemi-Varnamkhasti, M., Apetrei, C., Lozano, J., & Anyogu, A. (2018). Potential use of electronic noses, electronic tongues and biosensors as multisensor systems for spoilage examination in foods. *Trends in Food Science & Technology*, *80*, 7 .1-92

Ghoshal, G. (2018). Recent trends in active, smart, and intelligent packaging for food products. In *Food packaging and preservation* (pp. 343-374). Elsevier .

Halonen, N., Pálvölgyi, P. S., Bassani, A., Fiorentini, C., Nair, R., Spigno, G., & Kordas ,K. (2020). Bio-based smart materials for food packaging and sensors–a review. *Frontiers in materials*, *7*, 82 .

He, X., Pu, Y., Chen, L., Jiang, H., Xu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2023). A comprehensive review of intelligent packaging for fruits and vegetables: Target responders, classification, applications, and future challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *22*(2), 842-881 .

Kalpana, S., Priyadarshini, S., Leena, M. M., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, *93*, 145-157 .

Kuswandi, B., Moradi, M., & Ezati, P. (2022). Food sensors: Off-package and on-package approaches. *Packaging Technology and Science*, *35*(12), 847-862 .

Lu ,Y., Shi, Z., & Liu, Q. (2019). Smartphone-based biosensors for portable food evaluation. *Current Opinion in Food Science*, *28*, 74-81 .

Luo, X., Zaitoon, A., & Lim, L. T. (2022). A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(3), 2489-2519 .

Motelica, L., Ficai, D., Oprea, O. C., Ficai, A., & Andronescu, E. (2020). Smart food packaging designed by nanotechnological and drug delivery approaches. *Coatings*, *10*(9), 806 .

Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, *8*(1), 16 .

Mustafa, F., & Andreescu, S. (2018). Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging. *Foods*, *7*(10), 168 .

Mustafa, F., & Andreescu, S. (2020). Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. *RSC advances*, *10*(33), 19309-19336 .

Neethirajan, S., Ragavan, V., Weng ,X., & Chand, R. (2018). Biosensors for sustainable food engineering: challenges and perspectives. *Biosensors*, *8*(1), 23 .

Neethirajan, S., Weng, X., Tah, A., Cordero, J., & Ragavan, K. (2018). Nano-biosensor platforms for detecting food allergens–New trends. *Sensing and bio-sensing research*, *18*, 13-30 .

Nemes, S. A., Szabo, K., & Vodnar, D. C. (2020). Applicability of agro-industrial by-products in intelligent food packaging. *Coatings*, *10*(6), 550 .

Pirsa, S., Sani, I. K., & Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, *31*, 100789 .

Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, J. V., Vivancos, J.-L., & Martinez-Manez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of cleaner production*, *172*, 3398-3409 .

Priyadarshi, R., Ezati, P., & Rhim, J.-W. (2021). Recent advances in intelligent food packaging applications using natural food colorants. *ACS Food Science & Technology*, *1*(2), 124-138 .

Reshmy, R., Philip, E., Madhavan, A., Sindhu, R., Pugazhendhi, A., Binod, P., Sirohi, R., Awasthi, M. K., Tarafdar, A., & Pandey, A. (2021). Advanced biomaterials for sustainable applications in the food industry: Updates and challenges. *Environmental Pollution*, *283*, 117071 .

Roy, S., & Rhim, J.-W. (2021). Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(14), 2297-2325 .

Salgado, P. R., Di Giorgio, L., Musso, Y. S., & Mauri, A. N. (2021). Recent developments in smart food packaging focused on biobased and biodegradable polymers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 630393 .

Sani, M. A., Azizi-Lalabadi, M., Tavassoli, M., Mohammadi, K., & McClements, D. J. (2021). Recent advances in the development of smart and active biodegradable packaging materials. *Nanomaterials*, *11*(5), 1331 .

Sani, M. A., Tavassoli, M., Hamishehkar, H., & McClements, D. J. (2021). Carbohydrate-based films containing pH-sensitive red barberry anthocyanins: Application as biodegradable smart food packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, *255*, 117488 .

Singh, S., Gaikwad, K. K., & Lee, Y. S. (2018). Anthocyanin-A natural dye for smart food packaging systems. *Korean Journal of Packaging Science & Technology*, *24*(3), 167-180 .

Sobhan, A., Muthukumarappan, K., & Wei, L. (2021). Biosensors and biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: Challenges and opportunities. *Food Packaging and Shelf Life*, *30*, 100745 .

Sohail, M., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(15), 2650-2662 .

Song, T., Qian, S., Lan, T., Wu, Y ,.Liu, J., & Zhang, H. (2022). Recent advances in bio-based smart active packaging materials. *Foods*, *11*(15), 2228 .

Weston, M., Geng, S., & Chandrawati, R. (2021). Food sensors: Challenges and opportunities. *Advanced Materials Technologies*, *6*(5), 2001242 .

Weston, M., Phan, M. A. T., Arcot, J., & Chandrawati, R. (2020). Anthocyanin-based sensors derived from food waste as an active use-by date indicator for milk. *Food Chemistry*, *326*, 127017 .

Yong, H., & Liu, J. (2020). Recent advances in the preparation ,physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, *26*, 100550 .

Yousefi, H., Su, H.-M., Imani, S. M., Alkhaldi, K., M. Filipe, C. D., & Didar, T. F. (2019). Intelligent food packaging: A review of smart sensing technologies for monitoring food quality. *ACS sensors*, *4*(4), 808-821 .

Zhai, X., Sun, Y., Cen, S., Wang, X., Zhang, J., Yang, Z., Li, Y., Wang, X., Zhou, C., & Arslan, M. (2022). Anthocyanins-encapsulated3 D-printable bigels: A colorimetric and leaching-resistant volatile amines sensor for intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, *133*, 107989 .

Zhao, L., Liu, Y., Zhao, L., & Wang, Y. (2022). Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness. *Journal of Agriculture and Food Research*, *9*, 100340 .

Food Engineering Research/Vol.23/No.75/ Winter /2023/P: 85-110
Journal Home page: https://fooder.areeo.ac.ir/

Review

A review of biosensors based on Anthocyanins, betalains and Curcumins in smart food packaging

Bahareh Nowruzi*, Negin Khoshnood, Sara Sory

* **Corresponding Author:** Associate professor of Department of Biotechnology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
Email: bahare77biol@gmail.com
Received:8 July 2023 **Accepted**: 23 September 2023
http://doi: 10.22092/FOODER.2024.362829.1370

Abstract

Smart packages provide information of the state of the packaged food to the consumer by using materials that monitor and interact with the packaging environment, through an internal or external indicator. The use of artificial colors, as indicators of food freshness in food packaging, not only have toxic, carcinogenic and mutagenic properties, but also threaten the health of consumers and the environment, and in addition, they are also not suitable for application in food industries. But nature-based materials can be a suitable alternative to be used as indicators and sensors. Therefore, the purpose of writing of this article is to review the latest information about biosensors made based on compounds obtained from natural extracts in food packaging. Obviously, bioactive extracts based on anthocyanins, betalins, and curcumins obtained from natural sources, including byproducts of food industry, have significant potential to function as biosensors.

Keywords: smart packaging, anthocyanins, betalains, curcumins, food shelf life, food freshness

© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).