مروری بر حسگرهای زیستی و شناساگرهای شیمیایی بر نظارت کیفی و ایمنی گوشت و فراورده‌های گوشتی

بهاره نوروزی*[۱]، ندا فرهودی فرد[۱]، سوگل قارونی فرد[۱]

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

چکیده

تضمین کیفیت و ایمنی محصولات گوشتی مستلزم اندازه‌گیری‌های سریع است تا از ایجاد و شیوع بیماری‌های ناشی از تغذیه جلوگیری کند. گرچه روش‌های میکروبیولوژی استاندارد و تکنیک‌های تحلیلی مرسومی برای نظارت بر ایمنی و کیفیت مواد غذایی موجود است، اما این روش‌ها اغلب زمان‌بر هستند و نیازمند کارشناسانی بامهارت و ابزارهای پیشرفته می‌باشند؛ بنابراین نیاز فوری به توسعه ابزارهایی ساده و سریع همواره احساس می‌شود تا در زمان کم، بر کیفیت گوشت و فراورده‌های گوشتی در چرخه تولید نظارت کند. حسگرهای زیستی و شناساگرهای شیمیایی به دلیل حساسیت بالا، تخصصی بودن، قابلیت تولید مجدد و پایداری، ابزارهایی مهم جهت نظارت و کنترل کیفیت محصولات گوشتی هستند. در این مقاله مروری، کاربرد حسگرهای زیستی در صنعت گوشت و نقش مهم آن‌ها در تعیین کیفیت گوشت موردبحث قرار می‌گیرد. علاوه بر آن نقش حسگرهای زیستی متفاوت بر شناسایی و تشخیص آلاینده‌ها، محصولات تقلبی، عوامل بیماری‌زا، آنتی‌بیوتیک‌ها و بقایای دارو در محصولات گوشتی نیز خلاصه‌شده است. یافته‌های به‌دست‌آمده حاکی از آن است که نسل جدید حسگرهای زیستی باید مبتنی بر نانو مواد باشد که با حساسیت بالا و ارائه پاسخ سریع بتواند در صنعت غذا به‌خصوص در بخش فراوری گوشت به‌گونه‌ای وسیع‌تر عمل نماید.

کلمات کلیدی: حسگرهای زیستی، تازگی گوشت، کنترل کیفی، آلاینده‌ها، عوامل بیماری‌زا

* bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

مقدمه

گوشت و محصولات گوشتی، بسیار فسادپذیر می‌باشند و مستعد تخریب شیمیایی، آنزیمی، میکروبی یا محیط در طی دوره فراوری تا انبارداری هستند. خطرات میکروبی جدید به‌طور مستقیم بر ایمنی محصولات گوشتی خام و فراوری‌شده اثر می‌گذارد و سبب آلودگی با *Escherichia coli Shiga* O157:H7، *Salmonella Enteritidis*، *Salmonella Typhimurium*، *Campylobacter jejumi*، *Listeria monocytogenes* و *Yersinia enterocolitica* می‌شوند (۱). این خطرات میکروبی ممکن است که در مراحل گوناگون فراوری یا طی انبارداری به چرخه تولید گوشت وارد شوند و منجر به شیوع بیماری‌های حاصل از گوشت شوند؛ بنابراین جنبه‌های کیفی و ایمنی گوشت از مسائلی هستند که باید در هر سطحی از مزرعه تا سر سفره موردتوجه قرار بگیرند و حفظ شوند. این موضوع تنها ازاین‌جهت مهم نیست که از منافع مصرف‌کننده حمایت می‌شود بلکه خطر ابتلا به بیماری‌های مشترک بین انسان و دام یا مسمومیت غذایی مربوط به گوشت را کاهش می‌دهد. به‌طورکلی بازرسی دام قبل و بعد از کشتار، مشاهده بصری، لمسی و برشی، برخی از روش‌های سنتی و زمان‌بر هستند که در بازرسی گوشت به کار می‌رفتند؛ اما این رویه‌ها برای حفاظت کامل از مصرف‌کنندگان کافی نیستند و ممکن است حتی احتمال آلودگی متقابل رابین محصولات افزایش بدهند (۲). برای غلبه براین مشکل بسیاری از آزمایشگاه‌ها از روش‌های متداول تحلیلی همچون کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا، کروماتوگرافی گازی، واکنش زنجیره‌ای پلیمراز PCR یا سنجش ایمنی وابسته به آنزیم (تست الایزا)، برای ارزیابی کیفیت گوشت تازه و محصولات گوشتی استفاده می‌کنند (۲).

گرچه بعضی از فرایندها و آزمون‌های تحلیلی بانام تحلیل‌های حسی، آزمون‌های شیمیایی و روش‌های مبتنی برکشت میکروبی گاهی مفیدند، اما آن‌ها زمان‌بر و هزینه‌بر هستند و به افرادی آموزش‌دیده و تجهیزات گران‌قیمت برای تحلیل‌های نمونه نیازمندند. به‌علاوه این روش‌ها به‌اندازه‌ای حساس نیستند تا فوری مسائل کیفی و ایمنی در گوشت را تشخیص بدهند. برای کنترل ایمنی غذا یک مسئله فوری برای حفاظت از سلامت عمومی توسعه ابزارهای آزمایشی کاربرپسند است که بتواند به تشخیص زودهنگام هرگونه عامل بیماری‌زا در چرخه تولید کمک کند (۳). تشخیص تازگی مواد غذایی، یکپارچه‌سازی زمان و دما، حسگرهای زیستی فساد میکروبی، حسگرهای نانو، بارکدها، برچسب‌های RFID (شناسایی فرکانس رادیویی) و غیره کاربردهای موفقیت‌آمیز مختلف حسگرهای زیستی هستند (۴). به‌علاوه، انواع بسته‌بندی‌های هوشمند با انواع حسگرهای زیستی یا برچسب‌گذاری هم‌اکنون در بازار موجود است که می‌توانند تأثیر به سزایی در فراورده‌های گوشتی بسته‌بندی‌شده ایجاد کنند (۵). این‌گونه مصرف‌کنندگان می‌توانند به‌راحتی تازگی و کیفیت گوشت یا فراورده‌های گوشتی را با نظارتی سریع قبل از خرید محصولات درک و قضاوت کنند (۶).

تفاوت اساسی بین یک حسگر و شناساگر این است که یک حسگر شامل یک پذیرنده و یک مبدل است. درحالی‌که یک شناساگر ساده و مقرون‌به‌صرفه است و از طریق بصری ارتباط مستقیم برقرار می‌کند. با پیشرفت‌های اخیر، حسگرهای زیستی امکاناتی جدید را برای ردیابی خطرهای مختلف در چرخه‌های ایمنی غذا فراهم کرده‌اند. حسگرهای زیستی نه‌تنها می‌توانند عوامل بیماری‌زای قدیمی و یا جدید را تشخیص بدهند، بلکه همچنین می‌توانند سموم، مواد مغذی، آفت‌کش‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها و میزان گلیکولیز در چرخه گوشت را هم تشخیص می‌دهند. به‌علاوه این حسگرها همچنین می‌توانند میزان مواد مغذی (پروتئین‌ها، اسیدهای چرب، ویتامین B)، pH، پارامترهای رنگ یا تلفات قطره‌ای طبیعی، تازگی، نرمی و غیره را هم تحلیل کنند (۷) (۸). اخیراً، حسگرهای زیستی پیشرفته با کاربرد فناوری نانو باعث ایجاد انقلابی در تشخیص کیفی مواد غذایی موجود شده‌اند (۹).

به‌علاوه، انواع مختلف مواد نانو همچون لوله‌های کربنی نانو، گرافیت و گرافن ممکن است سازگاری زیستی بیشتری را به این حسگرها می‌افزایند. در آینده‌ای نزدیک، این حسگرهای زیستی نانوی پیشرفته ممکن است نقشی حیاتی در تشخیص

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

دقیق و سریع هرگونه خطر فیزیکی، شیمیایی یا میکروبیولوژیکی در سیستم‌های حفاظت گوشتی بازی کنند (۱۰). گرچه بسیاری از مقالات بر روی حسگرهای زیستی تاکنون چاپ‌شده‌اند، بااین‌حال یک مرور جامع و به‌روز، بر مفید بودن حسگرهای زیستی در گوشت و محصولات گوشتی بسیار مفید خواهد بود. این مقاله، مروری بر پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای زیستی و کاربردهای آن‌ها در صنعت گوشت (تصویر ۱) است که پیشرفت‌های تحقیقاتی اخیر را درزمینه بسته‌بندی هوشمند گوشت مبتنی بر شناساگرها یا حسگرها ارائه می‌دهد.

استفاده بالقوه از حسگرهای زیستی برای غذاهای ماهیچه‌ای

تولید گوشت باکیفیت بالا و فراهم کردن محصولات گوشتی ایمن همراه با برچسب منجر به حفظ رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان و مقامات نظارتی می‌شود (۱۱). گرچه روش‌های متداولی همچون تشخیص عوامل بیماری‌زای میکروبی، آنتی‌بیوتیک‌ها و بقایای دارویی، مواد تقلبی و آلاینده‌ها، سموم، فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و غیره برای تحلیل کیفیت گوشت موجود است، اما این روش‌ها زمان‌بر و پرخرج هستند و به ابزار پیشرفته نیاز دارند تا نتیجه بدهند. به‌علاوه محققان و پردازشگرهای گوشت در جستجوی مداوم برای روش‌ها یا تکنیک‌های تحلیلی ساده، کم‌خرج و با کارایی آسان هستند که از ابزار قابل‌حملی برای تعیین کمی و کیفی گوشت و آلاینده‌ها با دقت بالا استفاده کند (۱۲).

در این رابطه، حسگرهای زیستی به دلیل حساسیت بالا و تخصصی بودن می‌توانند نقش حیاتی در تحلیل کیفیت گوشت بازی کنند. در کل یک حسگر زیستی یک ابزار حسی تحلیلی است که شامل ۲ بخش متمایز مبدل و یک تشخیص‌دهنده زیستی به همراه اجزاء پشتیبان است. فواید اصلی استفاده از حسگرهای زیستی در سیستم تغذیه این است که ارزان هستند، کار با آن‌ها آسان است و زمان کم‌تری برای تحلیل نمونه‌ها نیاز دارند و می‌توانند طیف وسیعی از نمونه‌های غذایی را به‌طور کمی شناسایی کنند (۱۳). به‌علاوه وقتی‌که اجزاء فعال بیولوژیکی همچون گلوکز، لاکتات، آنتی‌بادی‌ها، بقایای دارویی، گیرنده‌ها، سلول‌های باکتریایی و یا سموم به مبدل متصل می‌شوند، منجر به ایجاد سیگنال‌های الکتریکی معنی‌دار و قابل‌اندازه‌گیری خواهند شد (۱۴).

استفاده و انتخاب هرگونه عنصر تشخیص زیستی برای تحلیل سریع مواد هدف یا اجزائی که به لحاظ بیولوژیکی فعال هستند، حیاتی است. به‌عنوان‌مثال می‌توان به روش‌های تشخیص بدون برچسب مانند رزونانس پلاسمون-SPR، طیف‌سنجی جرمی، موج صوتی و غیره و یا برپایه برچسب مانند فلورسانس، شیمی لومینسنس و غیره اشاره کرد (۱۵). فواید و معایب حسگرهای زیستی در جدول ۱ خلاصه‌شده است.

جدول ۱: فواید و معایب حسگرهای زیستی (۱۶)

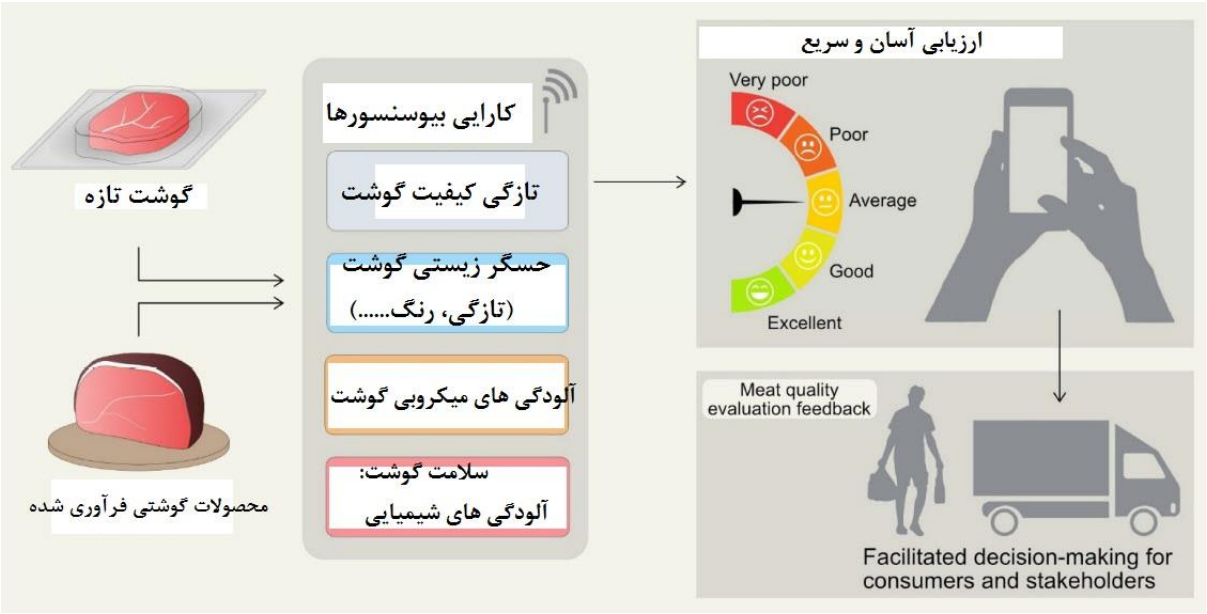
نوع حسگر زیستی	فواید	معایب
الکتروشیمیایی	-پاسخی قوی و سریع، مقرون‌به‌صرفه، صرفه‌جویی در زمان -با محدودیت‌های تشخیص پایین -حساسیت بالا -به حجم نمونه کمی نیاز دارد.	-حساس به تغییر دما -طول عمر کوتاه -حساس به اثرات ماتریکسی نمونه -محلول‌های با خاصیت بافری شدید ممکن است در تشخیص مداخله ایجاد کنند
نوری	-حساسیت بالا، اختصاصی، مقرون‌به‌صرفه -ازلحاظ شیمیایی بی‌اثر	-حساس به تداخلات محیطی -می‌تواند پرهزینه و شکننده باشد.

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

	-تشخیص سریع -امکان شناسایی چند آنالیت - قابل‌اعتماد، کوچک و سبک‌وزن	-مستعد آسیب فیزیکی -قیمت بالای برخی ابزار -افرادی آموزش‌دیده نیاز دارد. -سیگنال فلورسنتی ممکن است به‌اندازه کافی قوی نباشد.
بر اساس توده	-مفید برای تحلیل‌هایی که فاقد خاصیت رسانایی الکتریکی هستند و سیگنال‌های فلورسنتی هم ندارند. -زمان پاسخگویی سریع -هزینه ساخت پایین	-شکننده -به لحاظ مکانیکی ناپایدار

حسگرهای زیستی برای ارزیابی تازگی گوشت

تازگی غذا یک صفت کیفی مهم است که تأثیر مهمی بر تصمیم مصرف‌کنندگان برای خرید می‌گذارد. در مورد گوشت و محصولات گوشتی، تازگی، کیفیت و ایمنی محصول برای تولیدکنندگان و هم برای مصرف‌کنندگان مهم است (۱۷). رایج‌ترین ویژگی‌های کمی و کیفی مورداستفاده برای ارزیابی تازگی گوشت، pH، ظاهر بصری و عطر گوشت است. اسیدهای آلی، آمین‌های بیولوژیکی، گلوکز، سولفور، کربن دی‌اکسید حاصل از رشد میکروبی و اجزاء شیمیایی تولیدشده به دلیل تغییرات اکسیداتیو (لیپید و پروتئین) طی انبارداری، تازگی و کیفیت غذاهای ماهیچه‌ای را تغییر می‌دهند(۱۸). متابولیت‌های میکروبی و اجزاء شیمیایی اکسیداتیو به شناساگر واکنش نشان می‌دهند و به‌گونه‌ای غیرقابل‌برگشت بر تازگی ظاهری و کیفیت محصول اثر می‌گذارند(۱۹). بنابراین یک شناخت کامل متابولیک‌هایی که می‌تواند بر تغییرات کیفی خاص محصولات غذایی طی زمان اثر گذارد پیش‌نیاز ضروری برای تولید شناساگرها است. البته می‌توان از بسیاری از روش‌های آزمایشگاهی مانند اندازه‌گیری نیتروژن (TVB-N)، pH، کمیت باکتری‌های کشت‌شده نیز استفاده کرد که نیازمند زمان زیادی است. بنابراین یافتن روش‌های جدید برای تشخیص تازگی گوشت جهت اطمینان از عرضه غذای گوشتی باکیفیت و ایمن به مصرف‌کنندگان مهم است(۲۰) (شکل یک).



شکل یک: استفاده از حسگرهای زیستی برای ارزیابی کیفیت گوشت و گوشت را نشان می‌دهد (۱۶).

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

تنها شاخص نشان‌دهنده تازگی گوشت، هایپوزانتین (Hx) است که محصول تخریب ATP (آدنوزین تری فسفات) هست (۲۱). برای تحلیل تازگی گوشت حسگرهای زیستی مختلفی مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای مثال محققان یک حسگر Hx امپرومتریک برپایه گرافن با تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2-G) را ساختند که برای تخمین Hx در گوشت خوک که ۷ روز در دمای اتاق نگهداری شده بود استفاده شد (۲۲). به دنبالان یک حسگر زیستی امپرومتریک با نانو ذرات Fe_3O_4/پلی آنیلین برای تخمین زانتین در گوشت ماهی و مرغ تولید گردید. این حسگر زیستی توانست زانتین را در ۸ ثانیه به دلیل زمان پاسخ سریع شناسایی کند. به‌طور مشابهی دانشمندان یک حسگر زیستی مبتنی بر آنزیم را همراه با یک الکترود اکسیژن برای اندازه‌گیری تازگی گوشت خوک توسعه داده و بهینه‌سازی کردند (۲۳). در مطالعه دیگری محققان یک حسگر زیستی فیبر نوری را برای تخمین زانتین در گوشت مرغ استفاده کردند که بسیار سریع و قابل‌اعتماد بود و حجم کمی از نمونه را جهت تشخیص زانتین نیاز داشت (۲۴). محققان دیگر دو حسگر زیستی مبتنی بر آنزیم اکسیداز (پوترسین و دیامین) را تولید کردند که غلظت آمین بیوژنیک را در محصولات گوشتی با نمونه‌های ارزیابی‌شده توسط HPLC مقایسه می‌کند. محققان گزارش کردند که حسگرهای زیستی می‌توانند میزان پوترسین را در طیف ۲-۱ میلی‌گرم بر لیتر با حد تشخیص ۱/۳-۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری کنند و به دلیل ماهیت ساده و زمان کوتاه تشخیص آنالیت‌ها بر روش HPLC ترجیح داده شود (۲۵). اخیراً استفاده از *Bacillus subtilis* به‌عنوان یک حسگر زیستی برای ارزیابی فساد گوشت هم گزارش‌شده است. بوی آزادشده از گوشت فاسد می‌تواند به‌طور خاصی، محرک شناخته‌شده‌ای را برای تحریک تشکیل پروتئین فلورسنت در *B. subtilis* فعال کند.

ظاهر/رنگ، مزه، نرم بودن و آبدار بودن مهم‌ترین صفات کیفی گوشت هستند. در میان این‌ها، نرمی، یکی از صفات کیفی اصلی است و یک صفت کیفی مهم برای رضایت‌مندی مصرف‌کننده و خرید دوباره گوشت توسط اوست (۲۶). نرم شدن گوشت تا حد زیادی به تخریب پروتئین‌های اسکلت سلولی که مسئول یکپارچگی ساختاری فیبرهای ماهیچه‌ای است بستگی دارد (۲۷). تغییرات عضله پس از مرگ و تغییرات در نرمی عضله با ۵ مکانیسم قابل توضیح است: الف) تخریب میکروفیبریل‌های عضلانی توسط سیستم‌های پروتئین ساز درونی طی پیر شدن، ب) تخریب کلاژن‌ها، ج) طول سارکومر و وضعیت آن در دوره پس از مرگ، د) محتوای چربی داخل عضلات ه) دناتوره شدن پروتئین‌های ماهیچه طی پخت‌وپز (۲۸). در میان آن‌ها مطالعات تحقیقاتی مختلفی ثابت کرده‌اند که پروتئازهای کالپین، مسئول تغییرات در عضله/گوشت هستند. کالپین‌ها، کاتپسین‌ها، کاسپارها و پروتئازوم‌ها، آنزیم‌های پروتئولیتیک هستند که سبب تخریب پروتئین‌های میکروفیبریلی می‌شوند و نهایتاً نرمی گوشت را باعث می‌شوند. البته عوامل دیگری نظیر گلیکولیز و pH پس از مرگ هم بر نرمی گوشت اثر می‌گذارند (۲۹).

تکنیک‌های متداول مختلفی نظیر نیروی برشی Warner-Bratzler (WBSF)، تست الایزا، پروتئومیک ها یا کروماتوگرافی برای ارزیابی نرمی گوشت موجود هستند، اما این روش‌ها زمان‌بر و گران هستند و در مقیاس وسیع استفاده از آن‌ها بسیار دشوار است. در میان این‌ها روش WBSF در ارزیابی نرمی در مقایسه با روش‌های دیگر دقیق‌تر است (جدول ۲) (۳۰). این تکنیک مقاومت گوشت را طی برش ارزیابی می‌کند بدون این‌که نرمی گوشت را مستقیماً تعیین کند (۲۱).

محققان از یک روش انتقال انرژی تشدید فلورسانس (FRET) برای تخمین کالپاستاتین در یک حسگر زیستی نوری برای گوشت انبارشده استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که ۴۸ ساعت پس از کشتار، دقیق‌ترین زمان برای درجه‌بندی و دسته‌بندی گوشت با استفاده از حسگر زیستی نوری FRET هست (۳۱). محققان دیگر، یک حسگر ایمنی الکتروشیمیایی قابل‌حمل چندکاناله را بر اساس تشخیص زیستی آنتی‌بادی-آنتی ژن و تشخیص آمپرومتریک تولید کردند. این حسگر با دقت میزان کالپاستاتین را اندازه‌گیری می‌کرد. به‌علاوه نتایج حاصل از این حسگر زیستی، همبستگی مشابهی را در مقایسه

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

با روش WBSF نشان داد (۳۲). مطالعات بیشتری برای توسعه روش‌های حسگر زیستی کاربرپسند لازم است تا نظارتی سریع بر نرمی گوشت صورت گیرد که این کار به صنعت گوشت در فراهم کردن محصولات گوشتی باکیفیت بالا برای مصرف‌کنندگان کمک خواهد کرد. انواع مختلف حسگرهای زیستی مورداستفاده برای تشخیص تازگی گوشت و محصولات گوشتی در جدول ۲ خلاصه‌شده‌اند (۳۳).

جدول ۲: حسگرهای زیستی مورداستفاده برای تشخیص تازگی گوشت و محصولات گوشتی (۲۳)

آنالیت	عنصر تشخیص زیستی	الکترود مورداستفاده	تکنیک ساکن سازی و تشخیص	گوشت و محصولات گوشتی	حد تشخیص/حساسیت یا همبستگی
هایپوزانتین	زانتین اکسیداز	حسگر امپرومتریک، هایپوزانتین، نانو کامپوزیت گرافن/تیتانیوم دی‌اکسید	فعالیت الکتروکاتالیتیک	گوشت خوک	LOD: ۹/۵ میکرومتر حساسیت: ۴/۱ نانوانگستروم بر میکرومتر
گلوکز، تری گلیسیرید و لاکتیک اسید	گلوکز و لاکتیک اسید	دستگاه Accutrend plus	–	عضله لانگیسیموس خوک	سطح دقت: ۸۶/۵۴ درصد Rc=0.93 ρ<0.01
زانتین	زانتین اکسیداز	الکترود گرافیتی	ساکن سازی با گلوتارآلدئید	گوشت مرغ	LOD: ۰/۰۷۴ متر حساسیت: ۱۲۴ میکروانگستروم بر متر
کالپاستاتین	آنتی‌بادی خاص برای کالپاستاتین	سیستم Tendercheck، دستگاه قابل‌حمل الکتروشیمیایی	واکنش ایمنی	گوشت گاو	همبستگی R^2=0.621 بین کالپاستاتین و WBSF
هایپوزانتین	زانتین اکسیداز	حسگر زیستی رنگ‌سنج مبتنی بر کاغذ	واکنش کاتالیتیک دی آنزیم	نمونه‌های گوشتی تازه و فراوری‌شده	LOD: ۱/۸ میلی‌گرم بر لیتر حد کمی: ۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر
کاداورین	سیکلام-(۱ و ۴ و ۸ و ۱)-تتراآزاسیکلوتترادیکن	لایه چسبندگی تیتانیومی (۳ نانومتر) کنسول‌های سیلیکوت نیترید شامل لایه‌های پیزوالکتریک	سیلیکون، طلا	گوشت گاو، مرغ یا خوک	–
زانتین	گوانین دی آمیناز، زانتین اکسیداز	دیسک‌های دوار پلاستیکی به‌عنوان حسگر زیستی، فیبر کاوشگر نوری	ساکن سازی آنزیمی با روش هیدروسول-ژل، هم‌زمان زانتین اکسیداز و رنگ جاذب فنل قرمز	گوشت مرغ	LOD: ۰/۵ میکرومتر طیف خطی: ۰/۵ میکرومتر تا ۱۵۰ میکرومتر
IMP	۵′-نوکلئوتیداز و زانتین اکسیداز	سه سیستم الکترود شامل یک الکترود GCE تغییریافته، یک الکترود Ag/AgCl، یک سیستم پلاتینوم به‌عنوان الکترودهای یک پوشش چندلایه‌ای از نانوزل	نانو ژل‌های GCE/Ti3C2TX-Au@Pt	گوشت مرغ، خوک، گاو و گوسفند	LOD: ۲/۷۳ نانوگرم بر میلی‌لیتر طیف خطی: ۰/۰۴ تا ۱۷ گرم بر لیتر ضریب همبستگی ۰/۹۹۶۴

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

		-۵۰ /GCE/Ti3C2TX-Au@Pt نوکلئوتیداز زانتین			
کالپاستاتین	آنتی کالپاستاتین آنتی‌بادی	حسگر زیستی لوله کاپیلاری نوری	سیلانیزاسیون کووالانسی بی‌حرکت کردن	عضله لانگیسموس از گوشت گاو	فعالیت کالپاستاتین (R^2=0.6058)
زانتین	زانتین اکسیداز	پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی، الکترود بازمانده کربنی	بی‌حرکت کردن کووالانسی توسط گلوتارآلدئید	گوشت مرغ	LOD: ۰/۱ میکرو مول غلظت‌های خطی: ۳۶-۰/۲ میکرو مول (R^2=0.997)
گلوکز	گلوکز اکسیداز	الکترود کربن شیشه‌ای که با چند جداره نانولوله‌های کربنیو کیتوزان تغییریافته است.	پیوند متقابل با آنزیم از طریق گلوتارآلدئید با BSA	گوشت گاو	LOD: ۰/۰۵ میلی مولار طیف خطی: ۰/۲-۱/۲ میکرو مول بر لیتر خطی بودن (R^2=0.9902)

BSA: آلبومین سرم گاوی؛ GA: گلوتارآلدئید؛ Hx: هایپوزانتین؛ IMP: اینوزین مونوفسفات؛ LOD: محدوده تشخیص؛ TVB-N: مواد معطر کل برپایه نیتروژن؛ WBSF: نیروی برشی Warner-Bratzler

عملکرد حسگرهای زیستی ازلحاظ دقت و ثبات و پایداری در درازمدت می‌تواند با استاندارد کردن عناصر حسگر و غلبه بر اثرات محیطی مانند کنترل دما بهبود یابد. حفظ ثبات عناصر زیستی مختلف در دستگاه‌های حسگرهای زیستی باید قبل از تجاری‌سازی، تضمین شود. کاربرد نانو فناوری (۳۴) یا ارتباط آن با مولکول‌های زیستی با میل ترکیبی بالا، می‌تواند تشخیص انتخابی و حساس آنالیت‌های هدف را افزایش بدهد (۳۵). همچنین ترکیب مواد نانویی مختلف مثل نانو کامپوزیت‌ها، نانو ذرات، نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها درون ساختارهای حسگر می‌تواند حساسیت، زمان پاسخ و کارایی را بهبود دهد (۳۶). استراتژی‌هایی همچون مطالعه خصوصیات مواد نانو، شرایط کاربرد آن‌ها برای کاهش ناسازگاری در پاسخ تحلیلی و خصوصیات ابزارهای حسگر و بهبود عملکرد و کاربرد عملی این‌چنین حسگرهایی پیشنهاد می‌شود (۳۶).

حسگرهای زیستی برای تشخیص آلاینده‌های میکروبی در گوشت

شیوع بیماری‌های ناشی از غذا سبب صدماتی جبران‌ناپذیر به‌سلامت انسان و اقتصاد می‌گردد. آلودگی میکروبی در هر محصول غذایی ممکن است که به‌وسیله مواد خام یا با آلودگی در هر مرحله از سیستم فراوری غذا اتفاق افتد (۳۷)؛ بنابراین یک سیستم نظارت محیطی مداوم میکروبیولوژیکی برای تشخیص زودهنگام موجودات زنده بیماری‌زا در چرخه غذایی لازم و ضروری است تا از ایمنی میکروبیولوژیکی اطمینان حاصل شود. برای تشخیص آلودگی میکروبی، از روش‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی قدیم شامل شمارش کلونی باکتری، رنگ‌آمیزی و آزمون‌های کاهش متیلن بلو استفاده می‌شود. علاوه بر آن تکنیک‌های متداول مختلفی نظیر تست الایزا، PCR و تشخیص فلورسنتی هم در دسترس هستند (۳۸). گرچه اغلب روش‌های تحلیلی پیشرفته نیاز به آزمایشگاه‌هایی مجهز، ابزاری پیشرفته و گران‌قیمت و کارشناسانی بامهارت دارند. اغلب این روش‌ها مستلزم مراحل آماده‌سازی نمونه و مراحل پردازش هستند که شامل مراحل غنی‌سازی و انکوباسیون مختلفی است و می‌تواند نتیجه دهی آن ۱۰ روز طول بکشد (۳۹). این محدودیت‌ها منجر به استفاده از روش‌هایی شده است که قدرت تحلیل بالا، دقیق

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

و تخصصی‌تر داشته باشند. اخیراً ابزارهای تحلیلی نظیر حسگرهای زیستی با حساسیت بالا در دسترس شده‌اند که می‌توانند سموم و متابولیت‌های آن‌ها در محصولات مختلف را تشخیص دهند (۴۰). امروزه حسگرهای زیستی کاربرپسند مختلفی همچون نوری، الکتروشیمیایی، فوتو الکتروشیمیایی و بیولومینسانس در دسترس می‌باشند. برای مثال حسگرهای زیستی نوری، نظارت سریع بر فعالیت‌های میکروبی را در محیط غذا تسهیل می‌کنند (۴۱). محققان یک حسگر زیستی چندکاناله را برای تشخیص خاص سه عامل بیماری‌زای مختلف غذا به نام‌های *E.coli* O157:H7، *S.enteritidis* و *L.*monocytogenes تولید کردند که همه به‌طور طبیعی غذا را آلوده می‌سازند (۴۲). در مطالعه‌ای دیگر، گونه‌های *Shigella sonnei* تشخیص داده شد و از دیگر موجودات زنده روده‌ای همچون *E.coli* و *S.typhimurium* با استفاده از حسگرهای زیستی فلورسنت جداسازی شد.

بر اساس برهمکنش و اثر متقابل آنتی ژن-گیرنده زیستی، انواع مختلفی از حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی همچون امپرومتریک، امپدیمتری، پتانسیومتری و هدایت سنجی موجود هستند. یک حسگر ایمنی الکتروشیمیایی تهیه‌شده با نانوکمپوزیت کیتوزان (طلا) گزارش‌شده است که قابلیت تشخیص تا ۵-۱ log cfu/g را فراهم می‌سازد و ممکن است برای تشخیص مناسب آلودگی سالمونلا مفید واقع شوند (۴۳).

به‌طور مشابهی محققان دیگر گونه‌های *Campylobacter spp* را از گوشت مرغ با استفاده از یک حسگر الکتروشیمیایی آماده‌شده با پوششی نازک از الکترون‌های طلا جداسازی کردند. علاوه بر آن محققان گونه *C.jejuni* را از نمونه‌های گوشت بوقلمون و مرغ با استفاده از حسگر زیستی فلورسنتی با حد تشخیص $۲/۱\times۱۰^{۴}$ log cfu/g تشخیص دادند. تشخیص سریع *C.jejuni* مهم است چراکه آن به‌عنوان یک عامل بیماری‌زای غذایی اصلی در نظر گرفته می‌شود که سبب اسهال و تب در مصرف‌کنندگان می‌گردد (۴۴). اخیراً حسگرهای برپایه نانو در تشخیص عوامل بیماری‌زای حاصل از غذا و سموم موردتوجه بسیار قرارگرفته‌اند. با استفاده از حسگرهای زیستی برپایه لوله نانو کربنی، محققان توانستند *E.coli* را در ۵ دقیقه با حد تشخیص ۲ log cfu/g تشخیص بدهند. در یک مطالعه دیگری محققان توانستند *E.coli* را با حد تشخیص بین ۱ تا ۷ log cfu/g با استفاده از روش طیف‌سنجی امپدیمتریک تشخیص بدهند (۴۵). محققان یک حسگر زیستی برپایه گوشی هوشمند را برای غربالگری اولیه آلودگی میکروبی در غذا آماده کردند. محققان از این سیستم همراه با دوربینی دیجیتال و یک حسگر زیستی و از یک گوشی هوشمند استفاده کردند تا عوامل بیماری‌زای میکروبی را در گوشت گاو شناسایی بکنند (۴۶). تشخیص ATP بر اساس بیولومینسانس، روش دیگری برای تشخیص فساد میکروبی است. به‌خوبی شناخته‌شده که ATP در تمامی سلول‌های زنده میکروبی (باکتری، کپک، مخمر و جلبک) به‌عنوان یک حامل انرژی فعال حضور دارد. برای تشخیص ATP مبتنی بر بیولومینسانس، شدت نور حاصل از تجزیه ATP در واکنش بیولومینسانس می‌تواند با استفاده از فوتون‌های بسیار حساس، از نورسنج‌هایی که در یک ابزار به نام اومینومتر قرار دارند، اندازه‌گیری شود. اگر ATP بیشتر باشد، شدت نور بیشتر به لحاظ واحدهای نور نسبی از واکنش به دست خواهد آمد. سنجش بیولومینسانس ATP یک ابزار مفید است که در زمان بسیار کمی نتایج موفقیت‌آمیزی می‌دهد. در مطالعه دیگری از آزمون ATP برای اندازه‌گیری شمارش باکتری‌ها در نمونه‌های به‌دست‌آمده از لاشه گاو و خوک استفاده کردند (۴۷). نتایج با روش‌های شمارش باکتری‌های متداول مقایسه شد و ضریب همبستگی مثبت ۰/۹۱ برای گوشت لاشه گاو و ۰/۹۳ برای گوشت لاشه خوک به دست آمد.

محققان دیگر از آزمون بیولومینسانس با نانو ذرات مغناطیسی برای تخمین سریع *E.coli* از گوشت چرخ‌کرده گاو که به‌طور مصنوعی آلوده‌شده بود استفاده کردند. این آزمون با حد تشخیص ۱/۳۰ log cfu/g بسیار موفقیت‌آمیز بود. گرچه نقطه‌ضعف این روش تشخیصی این است که ATP در تمامی موجودات زنده ذره‌بینی ازجمله گوشت هست؛ بنابراین ATP

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

باید در گوشت تجزیه شود قبل از این‌که آزمون بیولومینسانس انجام بگیرد (۴۸).

حسگرهای زیستی برای تشخیص آلاینده‌ها، آنتی‌بادی‌ها و بقایای دارویی در گوشت و محصولات گوشتی

آلاینده‌های مختلف همچون سموم، آفت‌کش‌ها، آنتی‌بادی، بقایای دارویی، دامپزشکی و افزودنی‌های خطرناک غذایی می‌توانند به سیستم چرخه غذا در هر مرحله فراوری واردشده و همه سیستم را آلوده کنند. بسیاری از تکنیک‌های مختلفی همچون HPLC؛ الکتروفورز کاپیلاری و طیف‌سنجی توده‌ای برای تحلیل نمونه‌ها در پایان مراحل فراوری موجودند (۴۹). بااین‌حال، این فرایندها پرهزینه و پیچیده هستند و به ابزار پیچیده و مداخله افراد ماهر نیاز دارند؛ بنابراین استفاده از روش‌های تشخیص سریع، قابل‌اعتماد و حساس‌تر به آلاینده‌ها در مراحل فراوری همواره احساس می‌شود. امروزه وجود بقایای مواد ضدمیکروبی در محصولات غذایی مشتق‌شده از حیوانات فراتر از حد مجاز شده است و این موضوع در سال‌های اخیر به‌شدت موردتوجه و بحث واقع‌شده است. نگرانی فزاینده از اثرات نامطلوب آن‌ها بر سلامت عمومی باعث واکنش‌های حساسیتی بالا، مقاومت به مواد ضدمیکروبی، اختلال در روده و حتی اختلالات عصبی شده است (۵)؛ بنابراین نظارت بر وجود غلظت‌های بالای بقایای ضدمیکروبی در محصولات گوشتی جهت تضمین ایمنی غذا بسیار مهم و ضروری است (۵۰, ۵۱). در همین زمینه، SPR تکنیکی است که به‌طور گسترده جهت شناسایی بقایای دارویی در حسگرهای زیستی پذیرفته‌شده است. با استفاده از تکنیک SPR، کلرمفنیکل و سولفونامیدها در گونه‌های مختلف گوشت نظیر خوک، گاو و مرغ سنجیده و اندازه‌گیری خواهند شد (۳۸). محققان یک حسگر مبتنی بر نورتابی شیمیایی را جهت چک کردن حضور بقایای بنزیمیدازول در گوشت گاو و گوسفند توسعه دادند (۵۲). این حسگر حساسیت فوق‌العاده بالایی دارد (دامنه تشخیص ۲۱–۱/۵ کیلوگرم بر میلی‌لیتر) و می‌تواند بقایا را ظرف مدتی کوتاه تشخیص بدهد (۱۸ دقیقه). محققان دیگری، یک حسگر زیستی الکتروشیمیایی برای تشخیص بقایای سفتیوفور در نمونه‌های گوشت بوقلمون استفاده شد. حسگر مقرون‌به‌صرفه بود و به‌سرعت آنتی‌بیوتیک‌ها را ظرف ۵ دقیقه حتی در غلظت‌های پایین (۱۰ نانوگرم بر میلی‌لیتر) تشخیص داد (۵۳).

یک حسگر زیستی باکتریایی دیگر قادر به تشخیص تتراسایکلین (TET) در ۳ ساعت بود که در آزمون‌های میکروبیولوژیکی متداول به‌طور تقریبی ۱۲ ساعت زمان نیاز بود. به‌علاوه حسگر مقرون‌به‌صرفه و با حساسیت بالایی بود (۱۶). جهت مقایسه عملکرد حسگر زیستی SPR با حسگرهای LC-MS/MS و GC-MS/MS در تشخیص کلرمفنیکل (CAP) و بقایای گلوکورونید در ماهیچه طیور، محققان نشان دادند که عملکرد حسگر زیستی باقابلیت تشخیصی ۰/۰۲ میکروگرم بر کیلوگرم بهتر بود (۵۴). تشخیص سولفادیازین و استامینوفن در نمونه‌های گوشت خوک و مرغ با استفاده از یک حسگر الکتروشیمیایی با دقت و ثبات بالا برای تعیین هم‌زمان هر دو نوع آنتی‌بیوتیک انجام شد. نتایج این آزمایش با نتایج به‌دست‌آمده توسط تحلیل HPLC قابل‌مقایسه بود. با استفاده از فناوری حسگر زیستی، آمینوگلیکوزیدها، لینکوزامیدها، کینولون‌ها و تتراسایکلین‌ها هم در نمونه‌های گوشت از گونه‌های مختلف حیوانی تشخیص داده‌شده‌اند (۳۸).

برای شناسایی سموم باکتریایی یا قارچی موجود در گوشت یا محصولات گوشتی حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی مفیدند. این آلاینده‌ها ممکن است در هر مرحله‌ای از چرخه فراوری غذا آلودگی ایجاد کنند یا حتی طی حمل‌ونقل و انبارداری غذا را آلوده کنند (۴۷). سموم تنها ازنقطه‌نظر سلامت عمومی مضر نیستند بلکه سبب خسارات اقتصادی شدیدی هم می‌شوند. چندین گزارش دراین‌باره موجود است. برای مثال، با استفاده از یک حسگر زیستی الکتروشیمیایی، استافیلوکوک انتروکسین B در گوشت خوک و شیر خوراکی و تریکوتسن (سم T-2) در گوشت

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

خوک شناسایی شدند (۵۵). در مطالعه‌ای دیگر یک حسگر زیستی SPR به‌عنوان ابزاری برای تحلیل سریع استافیلوکوک انتروکسین B در گوشت بسته‌بندی‌شده به کار رفت (۸).

به‌علاوه افزودنی‌های غذایی به‌عنوان جزئی از غذا به‌طور گسترده‌ای در صنعت غذا جهت حفظ و بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی، حسی و تغییر شکل استفاده می‌شود و طول عمر محصولات را افزایش می‌دهند. معمولاً افزودنی‌های غذایی استفاده‌شده نیتریت، بنزوئیک اسید، مونوسدیم گلوتامات (MSG)، پروپیل گالات و رنگ‌های غذا هستند که اگر بیشتر از حد مجاز به کار روند ناخوشایند و خطرناک هستند. محققان یک حسگر زیستی امپرومتریک و حسگر زیستی آنزیمی (گلوتامات دهیدروژناز و گلوتامات اکسیداز) را برای تشخیص وجود مقادیر زیاد MSG در مواد غذایی تولید کردند که می‌تواند خطر زیادی برای سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد (۱۳). حسگر زیستی امپرومتریک دیگر توسط محققان ساخته شد تا وجود بنزوئیک اسید را در مواد غذایی فراوری‌شده با استفاده از بافت قارچ، تیروزنیاز و پلی فنل اکسیداز به‌عنوان ترکیبات تشخیص بیولوژیکی بررسی کند (۵۶). با کاربرد حسگر زیستی امپرومتریک، محققان سطوح نیترات را در گوشت تخمین زدند و نشان دادند که این روش ارزان و ساده است و دقت و حساسیت بالایی دارد. به‌علاوه این روش می‌توانست نیترات را با LOD $۲/۲ \times ۱۰^{-۹}$ مولار تخمین بزند و زمان پاسخ آن ۱۰ ثانیه بود (۵۷).

تقلب در گوشت عمدتاً از طریق افزودن متقلبانه گونه‌های گوشت ارزان‌تر/باکیفیت پایین یا ترکیبات غیر گوشتی با برچست گذاری اشتباهی بر محصولات تجارت واقعی برای سود اقتصادی انجام می‌شود. چندین گزارش نشان می‌دهند که کاربرد حسگرهای زیستی SPR و الکتروشیمیایی، امکان تشخیص نمونه‌های گوشتی تقلبی یا محصولات گوشتی فراوری‌شده را فراهم می‌کنند. برای مثال، حسگرهای زیستی DNA مبتنی بر SPR برای تشخیص نمونه‌های گوشت الاغ در سوسیس حاصل از گوشت گاو به کار رفتند. حسگر خاص بود و حساسیت بالایی با LOD تشخیصی ۱ نانو مول داشت (۵۸). به همین ترتیب در مطالعه‌ای دیگر یک حسگر زیستی DNA الکتروشیمیایی وقتی‌که بیش از ۱۰ درصد به نمونه‌های بیولوژیکی افزوده شد گوشت خوک را در محصولات غذایی تشخیص داد (۵۹). حسگرهای زیستی همچنین می‌توانند گوشت تقلبی را از گونه‌های حیوانی نزدیک به هم تشخیص بدهند. با استفاده از یک حسگر زیستی الکتروشیمیایی امپرومتریک بدون PCR، ظرف یک ساعت بدون استخراج یا تکثیر هرگونه ماده ژنتیکی گوشت گاو از گوشت اسبی که متقلبانه به آن افزوده‌شده بود (۰/۵ درصد وزنی/وزنی) به دست آمد (۶۰).

آلرژی یا حساسیت‌های غذایی حاصل از مواد حساسیت‌زای مختلف به‌عنوان مشکل سلامت عمومی مهم محسوب می‌شوند. برای مثال آلبومین سرم خوک (PSA) یک ماده حساسیت‌زا در گوشت خوک و محصولات آن است که می‌تواند واکنش‌های حساسیتی را سبب شود. گرچه روش‌های مرسوم نظیر PCR، الایزا و طیف‌سنجی جرمی برای تحلیل مواد حساسیت‌زای غذایی به کار می‌روند، SPR می‌تواند به‌سرعت و با دقت PSA را با LOD برابر ۱۹/۸۱ نانوگرم بر میلی‌لیتر مشابه روش مبتنی بر تست الایزا تشخیص بدهد (۶۱).

حسگرها و شاخص‌های بسته‌بندی هوشمند گوشت و محصولات گوشتی

اخیراً هیچ روش استاندارد و قابل اتکایی برای تأیید رضایت‌بخش تازگی گوشت به‌جز آنالیز حسی، آزمون‌ها، شیمیایی و میکروبیولوژیکی وجود ندارد. مصرف‌کنندگان انتخاب دیگری ندارند جز این‌که تاریخ تولید و تاریخ انقضا را بر روی بسته‌بندی مواد چک کنند (۶۲). سیستم‌های بسته‌بندی متداول مواد غذایی با تاریخ‌های انقضا می‌توانند غذا را از میکروب‌های محیطی حفظ کنند و فساد محصول را برای مدتی معین به تأخیر بیندازند. افزایش روزافزون شیوع بیماری‌های ناشی از گوشت طیور نشانه این است که تاریخ‌های انقضای درج‌شده روی بسته‌بندی مواد در حفظ

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

مصرف‌کنندگان از تهدید گوشت و محصولات گوشتی فاسد کافی نیستند.

برای غلبه براین مشکل، تحقیق در مورد ادغام موادی هوشمند با سیستم‌های بسته‌بندی سنتی در حال افزایش است. این نوع از سیستم بسته‌بندی هوشمند با حسگرها یا شاخص‌های مختلفی می‌توانند محیط داخل یا خارج محصولات را حس و ردیابی کرده و تشخیص داده و ثبت کنند و تبدیل به ابزار امیدبخش برای تشخیص تازگی محصولات غذایی گردند (۶۳). تا آنجا که به گوشت و محصولات گوشتی مربوط است سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند می‌توانند در سراسر چرخه تولید، کیفیت را سریعاً بررسی کند و هرگونه افت کیفی را با کمک مواد کروموژنیک (رنگ‌زا) تشخیص دهند. چندین شاخص یا سیستم بسته‌بندی مبتنی بر حسگر شامل شاخص‌های تازگی، حسگرهای گازی، شناساگرهای زمان-دما، شناساگرهای pH، بارکدها و برچسب‌های RFID برای ارزیابی تازگی گوشت با استفاده از الگوهای تغییر زنگ شناساگر در دسترس هستند. غیر از این‌ها، شناساگرهای تازگی مبتنی بر حساسیت به pH به دلیل کاربرد ساده و نتایج معتبر نیز محبوبیت پیداکرده‌اند (۶۴). در حقیقت طی فساد میکروبی پس از تخریب ترکیبات مغذی گوشت، متابولیت‌های اسیدی و قلیایی همچون NH_3، CO_2، H_2S، TVB-N شامل دی متیل آمین و تری متیل آمین آزاد می‌شوند. وقتی‌که این متابولیت‌ها در فضای داخل بسته‌بندی با مواد رنگ‌زای هوشمند تماس برقرار می‌کنند، یک تغییر کروماتیک به دلیل حساسیت به pH آن‌ها رخ می‌دهد؛ بنابراین شناساگر کروموژنیک با متابولیت‌های میکروبی واکنش داده و تغییرات رنگی را به دلیل تغییرات pH به نمایش می‌گذارد (۶۵).

مواد شیمیایی و طبیعی مختلفی اخیراً به‌عنوان شناساگرهای تازگی محصولات غذایی در مطالعات گوناگون مورداستفاده قرارگرفته‌اند، دلیل آن‌هم پاسخ سریع آن‌ها، توانایی تغییر رنگ و ثبات خوب آن‌ها بوده است. معمولاً شناساگرهای شیمیایی مورداستفاده متیل، فنول و بروموفنول قرمز، بروموفنول آبی، بروموکرسول بنفش و بروموکرسول سبز هستند(۷). این مواد می‌توانند به‌عنوان شناساگرهای غیر تماسی جهت جلوگیری از تماس مستقیم بین شناساگرهای شیمیایی و غذا با توجه به ورود شناساگر به مواد غذایی به کار روند (۴۷). محققان یک حسگر شناساگر رنگ‌سنجی با بروموفنول آبی را جهت بررسی تخریب کیفی در برش‌های گوشت بوفالوی انبارشده ۹ روز در شرایط یخچال استفاده کردند (۶۶). نتایج نشان داد که تغییر رنگ حسگر شناساگر از زرد تا آبی، سطوح مختلف فساد را به دلیل افزایش غلظت TVB-N نشان می‌دهد که نمایانگر تخریب کیفیت گوشت است. در یک تحقیق متفاوت، محققان یک نشانگر نوع برچسبی مبتنی بر کاغذ لیتموس (قرمز تا آبی از pH ۵/۷ تا ۶) را طراحی کردند و آن را به جداره داخلی سینی پلی اتیلنی پوشیده در پوشش پلاستیکی متصل کردند (۶۷). این سینی حاوی گوشت گاو ذخیره‌شده در دمای معمولی بود. مطالعه گزارش داد که تغییر رنگ حسگر شناساگر با تولید آمین‌های بیولوژیک صورت می‌گرفت. آمین‌هایی که توسط میکروب‌ها در داخل محصول بسته‌بندی‌شده تولید می‌شوند. محققان دیگر بسته‌بندی هوشمند مختلط مبتنی بر شناساگر حساس به pH را شامل بروموتیمول آبی و متیل قرمز و یک ترکیب از بروموتیمول آبی، بروموکرسول سبز و فنول قرمز به ترتیب برای مشاهده فساد سینه مرغ پوست‌کنده انبارشده در یخچال در شرایط بسته‌بندی و اتمسفر تغییریافته (MAP) تولید کردند. این شناساگرهای شیمیایی به‌خوبی به دی‌اکسید کربن تولیدشده و دیگر متابولیت‌های میکروبی با تغییر در رنگشان پاسخ دادند (۶۸).

شناساگرهای رنگ طبیعی که می‌توانند در بسته‌بندی هوشمند به‌طور بی‌خطری به کار روند آنتوسیانین، کاروتنوئیدها، کلروفیل، کورکومین و بتائین هستند. در بین این شناساگرهای طبیعی تازگی، آنتوسیانین به دلیل طیف گسترده کاربرد آن و الگوهای تغییر رنگ در دامنه‌های مختلف pH توجه بسیاری را به سمت خود جلب کرده است. آنتوسیانین یکی از مهم‌ترین فلاونوئیدهاست که می‌تواند از کلم پیچ بنفش، رزها، انار، بلوبری، انگور سیاه، بادمجان و رازبری سیاه استخراج شود. جدای از خواص خوب آن، آنتوسیانین

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

آب‌دوست، غیر سمی و بدون بو هستند. ثبات رنگ آنتوسیانین تحت تأثیر pH، نور، دما، یون‌های فلزی، آنزیم‌ها، اشعه فرابنفش، گازها و همچنین شکل‌های مختلف شیمیایی آنتوسیانین قرار می‌گیرد. استفاده از آنتوسیانین در سیستم‌های بسته‌بندی در مطالعات مختلفی گزارش‌شده است (۲). محققان آنتوسیانین را از رز و کلم پیچ قرمز استخراج کردند و آن را روی کاغذ صافی چاپ کردند تا یک بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر حسگر رنگ‌سنج آماده کنند. حسگر طبیعی می‌توانست آزاد شدن و انتشار آمونیاک را با تغییر رنگ از قرمز به سبز در pH بالاتر نشان دهد (۱۶). محققان دیگر یک پوشش هوشمند شامل نشاسته کاساوا و آنتوسیانین انگور را تولید کردند که آنتوسیانین را روی گوشت خوک اعمال کرده و در شرایط یخچال بیش از ۱۴ روز انبار کردند. نتایج یک همبستگی مثبت بین تغییر رنگ پوشش و فساد میکروبی را مشاهده کردند (۵۴). محققان دیگر یک نوع دیگر از بسته‌بندی هوشمند با آگار، نشاسته سیب‌زمینی و رنگ‌های طبیعی (آنتوسیانین‌ها) استخراج‌شده از سیب‌زمینی شیرین‌های بنفش را تولید کردند (۶۹). نتایج- تغییر در رنگ از قرمز به سبز را گزارش داد که نشانگر فساد نمونه‌های گوشت خوک بود.

بااین‌حال، حسگرهای شناساگر مبتنی بر رنگ کاربردهای عملی محدودی دارند آن‌هم به دلیل خواص مکانیکی و جلوگیری از ورود گاز و قطبیت بالای آن‌هاست (۱). این شناساگر طبیعی تغییر رنگ حساس به pH به بیوپلیمرهای زیست تجزیه‌پذیر، زیست سازگار و دوستدار محیط‌زیست مختلفی افزوده شد که آن را قابل‌خوردن کرده و برای تهیه بسته‌بندی هوشمند جهت ردیابی تازگی غذا آماده سازد (۷۰). انتخاب نانو ماده مناسب و کاربرد آن‌ها در پوشش‌های زیست تجزیه‌پذیر بسیار مهم است، از این نظر پلیمرهای زیستی بر اساس پلی ساکارید نسبت به پلیمر برپایه پروتئین یا لیپید ترجیح داده می‌شود، زیرا شبکه‌های چسبنده‌ای را با دیگر پلیمرها از طریق پیوندهای کووالانسی یا غیر کووالانسی تشکیل می‌دهند.

در مطالعه‌ای دیگر محققان بسته‌بندی هوشمندی را با صفحات نشاسته کاساوا تولید کردند تا به آنتوسیانین به‌عنوان یک شناساگر رنگی کمک کرده که بر فساد گوشت گاو ذخیره‌شده در انبار ۴ درجه طی ۳ روز کمک کند. نتایج همبستگی مثبتی را بین تغییر رنگ پوشش با تولید آمین بیولوژیک گزارش کرد (۷۱). محققان دیگر نوع مشابهی از مواد بسته‌بندی هوشمند را شامل پکتین و عصاره کلم پیچ قرمز تولید کردند که به لحاظ آنتوسیانین غنی بود. آنتوسیانین جهت قدرت بخشیدن مکانیکی به پوشش همراه با نرم‌کننده‌هایی به کار رفت. پوشش به سر محفظه‌های نگهداری محصولات گوشتی مختلف چسبانده شد و تغییر رنگ مشابهی از بنفش به زرد را وقتی‌که مواد نیتروژنی فرار به دلیل رشد میکروبی تولید شدند نشان داد (۷۲). محققان به‌طور موفقیت‌آمیزی، پوشش‌های دولایه بیولوژیکی حساس به آمین را با استفاده از آگار، صمغ ژلاتین، TiO_2 و آنتوسیانین برای تشخیص NH_3، تری متیل آمین و دی متیل آمین در طی مطالعه تخریب کیفیت گوشت تولید کردند (۷۳). محققان دیگر پوشش شناساگر دولایه‌ای دیگری حاوی کاراژینان، آنتوسیانین، کورکومین و یک‌لایه امولسیون شده از گلوکومانان روغن کنجاک و کاملیا را برای تشخیص تازگی توسعه دادند. این پوشش دولایه‌ای هوشمند امولسیون شده، تازگی را در گوشت مرغ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با تغییر محسوس رنگ به‌خوبی بررسی کرد (۷۴). برای بررسی تازگی گوشت خوک یک سیستم رنگ‌سنجی با ترکیب نانو پروتئین-پلی ساکارید ساخته شد. در این مطالعه ترکیب‌های نانوی گلیکول آلژینات ۱ و ۱ آلبومین-پروپیلن حاوی آنتوسیانین در ماتریس‌های پلی وینیل الکل-گلیسرول گنجانده شد تا خصوصیات قدرت و ممانعت را برای پوشش فراهم کند. تغییر رنگ از متمایل به بنفش به قرمز تا آبی تیره در پاسخ به وجود آمونیاک فرار مشاهده شد که نشان از کاهش تازگی در گوشت خوک بود (۷۵).

به همین ترتیب محققان دیگر بسته‌بندی هوشمندی را ایجاد کردند که از امنیت مصرف گوشت خوک اطمینان ایجاد کند. این بسته‌بندی به دنبال شناسایی میکروب‌ها و آمین‌های

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

بیولوژیک بود. برای این منظور، آنتوسیانین استخراج‌شده از سیب‌زمینی‌های رنگی (کینک کونگ سیاه) به نشاسته/گلیسرول و ژلاتین افزوده شد و برای توسعه بسته‌بندی به کار رفت. این پوشش حاوی آنتوسیانین غنی از ماتریکس، بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی را در کنار خواص استثنایی حسگر آمونیاک و TVB-N با تغییر رنگ نشان داد (۷۶). محققان دیگر از پوشش هوشمند کامپوزیت حساس به pH شامل نشاسته، ژلاتین و آنتوسیانین استخراج‌شده از تربچه قرمز برای بررسی فساد گوشت استفاده کردند. با ایجاد فساد، حساس به pH بودن پوشش، رنگ آن را از نارنجی به صورتی تغییر رنگ داد و سپس سریعاً با چشم غیرمسلح متمایل به آبی تا بنفش شدن آن قابل‌مشاهده بود (۷۷).

محققان دیگر پوشش هوشمند طیف‌سنج حساس به pH را با نانو الیاف پلی لاکتیک اسید و پلی‌اتیلن اکسید همراه به ریز جلبک *Spirulina* تولید کردند. *Spirulina* به دلیل رنگ طبیعی آبی–سبز آن شناخته‌شده است و شامل رنگیزه‌های مختلفی همچون بتاکاروتن، توکوفرول، فیکوسیانین، فیکواریترین و کلروفیل است و بنابراین نقشی مهم و تأثیرگذار را به‌عنوان شناساگر رنگی حساس به pH دارد. توده زیستی ریز جلبک توانسته با موفقیت در نانو الیاف پلیمر محصور شود و در معرض متابولیت‌های میکروبی در گوشت خوک انبارشده در دمای یخچال، از قرمز به سبز تغییر رنگ دهد (۷۸). محققان دیگر یک پوشش شناساگر دولایه‌ای را با استفاده از آنتوسیانین حاصل از رازبری تولید کردند. لایه بیرونی‌تر ماتریکس پوشش، توسط کیتوزان پوشیده شده بود. این ماتریس محصورشده سبب بهبود استحکام مکانیکی، خاصیت کشسانی، تیرگی بالا و ممانعت از نفوذ آب شد. پوشش دولایه‌ای نه‌تنها سبب بهبود ثبات آنتوسیانین شد، بلکه همچنین یک الگوی تغییر رنگ مثبت قابل‌مشاهده را بر اساس تغییرات pH نشان داد که نشان‌دهنده تغییر در کیفیت گوشت در شرایط انبار در یخچال بود (۷۹). یک فیلم مبتنی بر الیاف نانو با کورکومین، کیتوزان و پلی‌اتیلن اکسید توسط محققان دیگر جهت بررسی تازگی گوشت مرغ تولید شد. تغییر رنگ از زرد روشن به زرد متمایل به قرمز در پوشش، نشان‌دهنده این است که گوشت تولیدکننده TVB-N محیطی را ایجاد می‌کند که درنهایت سبب زوال می‌شود (۸۰). در مطالعه‌ای دیگر محققان از رنگی حساس به pH به نام بتالاین استفاده کردند که از آنتوسیانین در برابر pH مقاوم‌تر بود. بتالاین برای ایجاد پوششی هوشمند با ژلاتین و الکل پلی وینیل ترکیب شد. به دلیل حساسیت زیاد به pH، بتالاین‌ها برای استفاده به‌عنوان رنگ‌سنج بسیار موردتوجه هستند و وقتی برای بسته‌بندی گوشت مرغ و میگو آزمایش شدند با تخریب میکروبی طی زمان و تولید مواد نیتروژنی فرار، رنگ خود را از قرمز به زرد تغییر دادند (۸۱).

عوامل تأثیرگذار بر عملکرد تحلیلی حسگرهای زیستی

عملکرد تحلیلی حسگرهای زیستی به چندین پارامتر مرتبط نظیر دقت، گزینش پذیری، خطی بودن و دامنه، حساسیت، اختصاصی بود، تکرارپذیری، محدوده تشخیص/کمیت و غیره بستگی دارد (۸۲). همچنین اجزای حسگر بیولوژیکی (کاوشگر DNA، آنزیم، آنتی‌بادی‌ها، بافت، گیرنده‌های سلولی و غیره) می‌توانند فعالیت خود را ظرف مدت کوتاهی از دست بدهند آن‌هم به دلیل طبیعت بیولوژیکی مولکول یا مواجهه آن با تنش‌های محیطی نظیر pH، دما یا قدرت یونی است (۸۲). عملکرد حسگرهای زیستی ازلحاظ دقت و ثبات و پایداری در درازمدت می‌تواند با استاندارد کردن عناصر حسگر و غلبه بر اثرات محیطی بهبود یابد. همچنین می‌توان این‌ها را کنترل کرد برای مثال با کنترل شدید دما. برای حفظ ثبات عناصر زیستی مختلف در دستگاه‌های حسگرهای زیستی قبل از تجاری‌سازی، مهم این است که کاربرد آن‌ها تضمین شود. کاربرد نانو فناوری یا ارتباط آن با مولکول‌های زیستی با میل ترکیبی بالا می‌تواند تشخیص انتخابی و حساسیت آنالیت‌های هدف را افزایش بدهد (۳۵). ترکیب مواد نانویی مختلف مثل نانو کامپوزیت‌ها، نانو ذرات، نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها درون ساختارهای حسگر می‌تواند

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

حساسیت، زمان پاسخ و کارایی را بهبود دهد (۳۶). به همین دلیل استراتژی‌هایی همچون مطالعه خصوصیات مواد نانو، شرایط کاربرد آن‌ها و اعمال کالیبراسیون مناسب برای کاهش ناسازگاری در پاسخ تحلیلی و خصوصیات ابزارهای حسگر و بهبود عملکرد و کاربرد عملی این‌چنین حسگرهایی پیشنهاد می‌شود (۳۶).

نتیجه‌گیری نهایی

علی‌رغم تحقیقات بسیار درزمینه حسگرها و نشانگرها، حسگرهای زیستی بسیاری هنوز در بخش محصولات گوشتی وجود ندارند و هنوز زمان زیادی نیاز است تا روش‌های مرسوم و متداول به شکل تجاری بتوانند جایگزین شوند. طبق گزارش‌های موجود، صنعت فراوری گوشت باید بر استفاده از فناوری‌های حسگر زیستی تمرکز کند که تا با واکنش سریع عمل کرده و حساسیت بالایی داشته باشد و آلودگی‌ها را در چرخه فراوری گوشت به حداقل میزان رسانده و گوشتی باکیفیت و ایمن تولید کند که اعتماد و اطمینان مصرف‌کننده را جلب کند. امروزه با پیشرفته‌های اخیر درزمینه فناوری نانو، انقلابی در تولید حسگرهای زیستی و الکترونیک پدید آمده است. نانو مواد نسبت سطح به حجم بالا، استحکام مکانیکی زیاد و فعالیت کاتالیتیکی عالی، ثبات بالا، فعالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی بالا و خصوصیات مؤثر مغناطیسی و الکتریکی دارند که می‌توان از آن‌ها در بهبود کارایی تحلیلی حسگرهای زیستی بهره برد؛ بنابراین تحقیقات آینده باید بر درک خصوصیات جدید این مواد نانو و سازگاری آن‌ها با مولکول‌های زیستی متمرکز باشد تا نسلی جدید از حسگرهای زیستی مبتنی بر مواد نانو طراحی شود که نه‌تنها ارزان باشند بلکه به‌اندازه کافی قابل‌اعتماد باشند.

علاوه بر آن سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند یا هوشمند برپایه رنگیزه‌های طبیعی، نسل جدیدی از حسگرها هستند که نقش مهمی را در بررسی کیفیت درونی گوشت یا محصولات گوشتی در شرایط انبار جدا از ارائه اطلاعات دقیقی راجع به کیفیت و ایمنی محصولات بازی می‌کنند و حتی ممکن است جایگزین خوبی برای دیگر انواع سیستم‌های بسته‌بندی باشند چراکه ازلحاظ اقتصادی ایمن‌تر و کاربرپسند هستند. گرچه تحقیقات بیشتری برای غلبه بر محدودیت‌های مربوط به ناپایداری رنگیزه‌های حساس به pH در ماتریس‌های پلیمر زیستی و نشت پذیری آن‌ها به مواد غذایی موردنیاز است. مهم‌تر از همه، حسگرهای زیستی طراحی‌شده باید حتی‌الامکان حد تشخیص بسیار پایین، حساسیت بالا و زمان پاسخ سریع داشته باشند تا بتوانند تعداد بیشتری از نمونه‌ها را بررسی کنند، این‌گونه است که می‌توان از آن‌ها در صنعت غذا ازجمله در بخش فراوری گوشت به‌گونه‌ای وسیع‌تر استفاده کرد. علاوه بر آن گرچه پیشرفت زیادی در فناوری‌های حسگرهای زیستی در تشخیص موجودات زنده ذره‌بینی در غذاهای آلوده تا به امروز حاصل‌شده است، بااین‌حال تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است تا صنعتی شدن حسگرهای زیستی با روش‌های ساده‌تر، آسان‌تر و مقرون به‌صرفه‌تری انجام پذیرد.

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

منابع

1. Di Nardo F, Anfossi L. Commercial biosensors for detection of food additives, contaminants, and pathogens. Commercial Biosensors and Their Applications: Elsevier; 2020. p. 183-215.

2. Vallinayagam S, Paladhi AG, Pal K, Kyzas GZ. Multifunctional biosensor activities in food technology, microbes and toxins−A systematic mini review. Process Biochemistry. 2022.

3. Flauzino JM, Alves LM, Rodovalho VR, Madurro JM, Madurro AGB. Application of biosensors for detection of meat species: A short review. Food Control. 2022:109214.

4. Griesche C, Baeumner AJ. Biosensors to support sustainable agriculture and food safety. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2020;128:115906.

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

6. Khan M. Recent biosensors for detection of antibiotics in animal derived food. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2022;52(4):780-90.

7. Chauhan N, Jain U, Soni S. Sensors for food quality monitoring. Nanoscience for sustainable agriculture. 2019:601-26.

8. Alahi MEE, Mukhopadhyay SC. Detection methodologies for pathogen and toxins: A review. Sensors. 2017;17(8):1885.

9. Nowruzi B, Hashemi N. A Review on the Antimicrobial Effects of Nanoparticles and Atmospheric Cold Plasma Technology. Journal of Isfahan Medical School. 2023;41(729):631-42.

10. Singh BP, Shukla V, Lalawmpuii H, Kumar S. Indicator sensors for monitoring meat quality: A review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2018;7(4):809-12.

11. Malvano F, Pilloton R, Albanese D. Label-free impedimetric biosensors for the control of food safety–a review. International journal of environmental analytical chemistry. 2020;100(4):468-91.

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

13. Ahmed I, Lin H, Zou L, Li Z, Brody AL, Qazi IM, et al. An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. Packaging Technology and Science. 2018;31(7):449-71.

14. Ghasemi-Varnamkhasti M, Apetrei C, Lozano J, Anyogu A. Potential use of electronic noses, electronic tongues and biosensors as multisensor systems for spoilage examination in foods. Trends in Food Science & Technology. 2018;80:71-92.

15. Turasan H, Kokini J. Novel nondestructive biosensors for the food industry. Annual Review of Food Science and Technology. 2021;12:539-66.

16. Nanda PK, Bhattacharya D, Das JK, Bandyopadhyay S, Ekhlas D, Lorenzo JM, et al. Emerging Role of Biosensors and Chemical Indicators to Monitor the Quality and Safety of Meat and Meat Products. Chemosensors. 2022;10(8):322.

17. Gagaoua M, Pinto VZ, Göksen G, Alessandroni L, Lamri M, Dib AL, et al. Electrospinning as a promising process to preserve the quality and safety of meat and meat products. Coatings. 2022;12(5):644.

18. Hermann CA, Duerkop A, Baeumner AJ. Food safety analysis enabled through biological and synthetic materials: a critical review of current trends. Analytical Chemistry. 2018;91(1):569-87.

19. Nowruzi B, Khoshnood N, Sory S, Fard SG, Rezaei MR, Nejad FA, et al. Microbial Secondary Metabolites to Control Disease: A Mini-Review. Biotechnological Journal of Environmental Microbiology. 2022;1(3).

20. Wang X, Luo Y, Huang K, Cheng N. Biosensor for agriculture and food safety: Recent advances and future perspectives. Advanced Agrochem. 2022.

21. Nie W, Chen Y, Zhang H, Liu J, Peng Z, Li Y. A novel colorimetric sensor array for real-time and on-site monitoring of meat freshness. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2022;414(20):6017-27.

22. Albelda JAV, Uzunoglu A, Santos GNC, Stanciu LA. Graphene-titanium dioxide nanocomposite based hypoxanthine sensor for assessment of meat freshness. Biosensors and Bioelectronics. 2017;89:518-24.

23. Khaled AY, Parrish CA, Adedeji A. Emerging nondestructive approaches for meat quality and safety evaluation—A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021;20(4):3438-63.

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

24. Garg D, Verma N. Fibre-optic biosensor for the detection of xanthine for the evaluation of meat freshness. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1531(1):012098.

25. Shi Y, Li Z, Shi J, Zhang F, Zhou X, Li Y, et al. Titanium dioxide-polyaniline/silk fibroin microfiber sensor for pork freshness evaluation. Sensors and Actuators B: Chemical. 2018;260:465-74.

26. Gagaoua M, Bonnet M, De Koning L, Picard B. Reverse Phase Protein array for the quantification and validation of protein biomarkers of beef qualities: The case of meat color from Charolais breed. Meat Science. 2018;145:308-19.

27. Gagaoua M, Terlouw EMC, Mullen AM, Franco D, Warner RD, Lorenzo JM, et al. Molecular signatures of beef tenderness: Underlying mechanisms based on integromics of protein biomarkers from multi-platform proteomics studies. Meat Science. 2021;172:108311.

28. Purslow PP, Gagaoua M, Warner RD. Insights on meat quality from combining traditional studies and proteomics. Meat Science. 2021;174:108423.

29. Gagaoua M, Warner RD, Purslow P, Ramanathan R, Mullen AM, López-Pedrouso M, et al. Dark-cutting beef: A brief review and an integromics meta-analysis at the proteome level to decipher the underlying pathways. Meat Science. 2021;181:108611.

30. Terlouw EMC, Picard B, Deiss V, Berri C, Hocquette J-F, Lebret B, et al. Understanding the Determination of Meat Quality Using Biochemical Characteristics of the Muscle: Stress at Slaughter and Other Missing Keys. Foods. 2021;10(1):84.

31. Kademi HI, Ulusoy BH, Hecer C. Applications of miniaturized and portable near infrared spectroscopy (NIRS) for inspection and control of meat and meat products. Food Reviews International. 2019;35(3):201-20.

32. Lamri M, Bhattacharya T, Boukid F, Chentir I, Dib AL, Das D, et al. Nanotechnology as a processing and packaging tool to improve meat quality and safety. Foods. 2021;10(11):2633.

33. Naik KM, Srinivas D, Sasi B, Basha SJ. Biosensors in food processing-A review. Int J Pure App Biosci. 2017;5:1219-27.

34. Ali Anvar SA, Nowruzi B, Afshari G. A Review of the Application of Nanoparticles Biosynthesized by Microalgae and Cyanobacteria in Medical and Veterinary Sciences. Iranian Journal of Veterinary Medicine. 2023;17(1).

35. Racine L, Texier I, Auzély-Velty R. Chitosan-based hydrogels: recent design concepts to tailor properties and functions. Polymer International. 2017;66(7):981-98.

36. Qu B, Luo Y. Chitosan-based hydrogel beads: Preparations, modifications and applications in food and agriculture sectors–A review. International Journal of Biological Macromolecules. 2020;152:437-48.

37. Das AK, Nanda PK, Das A, Biswas S. Chapter 6 - Hazards and Safety Issues of Meat and Meat Products. In: Singh RL, Mondal S, editors. Food Safety and Human Health: Academic Press; 2019. p. 145-68.

38. Ali AA, Altemimi AB, Alhelfi N, Ibrahim SA. Application of biosensors for detection of pathogenic food bacteria: A review. Biosensors. 2020;10(6):58.

39. Batani G, Bayer K, Böge J, Hentschel U, Thomas T. Fluorescence in situ hybridization (FISH) and cell sorting of living bacteria. Scientific Reports. 2019;9(1):18618.

40. Weng X, Neethirajan S. Ensuring food safety: Quality monitoring using microfluidics. Trends in Food Science & Technology. 2017;65:10-22.

41. Alamer S, Eissa S, Chinnappan R, Herron P, Zourob M. Rapid colorimetric lactoferrin-based sandwich immunoassay on cotton swabs for the detection of foodborne pathogenic bacteria. Talanta. 2018;185:275-80.

42. Lv M, Liu Y, Geng J, Kou X, Xin Z, Yang D. Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection. Biosensors and Bioelectronics. 2018;106:122-8.

43. Vasconcelos H, Coelho LCC, Matias A, Saraiva C, Jorge PAS, de Almeida JMMM. Biosensors for Biogenic Amines: A Review. Biosensors. 2021;11(3):82.

44. Candoğan K, Altuntas EG, İğci N. Authentication and quality assessment of meat products by fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. Food Engineering Reviews. 2021;13:66-91.

45. Algahtani FD, Morshdy AE, Hussein MA, Abouelkheir ES, Adeboye A, Valentine A, et al. Biogenic amines and aflatoxins in some imported meat products: Incidence, occurrence, and public health impacts. Journal of Food Quality. 2020;2020:1-7.

46. Sohail M, Sun D-W, Zhu Z. Recent developments in intelligent packaging for enhancing

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

food quality and safety. Critical reviews in food science and nutrition. 2018;58(15):2650-62.

47. Sionek B, Przybylski W, Tambor K. Biosensors in evaluation of quality of meat and meat products–A review. Annals of Animal Science. 2020;20(4):1151-68.

48. Munekata PE, Finardi S, de Souza CK, Meinert C, Pateiro M, Hoffmann TG, et al. Applications of Electronic Nose, Electronic Eye and Electronic Tongue in Quality, Safety and Shelf Life of Meat and Meat Products: A Review. Sensors. 2023;23(2):672.

49. Khansili N, Rattu G, Krishna PM. Label-free optical biosensors for food and biological sensor applications. Sensors and Actuators B: Chemical. 2018;265:35-49.

50. Oyedeji AO, Msagati TA, Williams AB, Benson NU. Detection and quantification of multiclass antibiotic residues in poultry products using solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography with diode array detection. Heliyon. 2021;7(12):e08469.

51. Vishnuraj M, Kandeepan G, Rao K, Chand S, Kumbhar V. Occurrence, public health hazards and detection methods of antibiotic residues in foods of animal origin: A comprehensive review. Cogent Food & Agriculture. 2016;2(1):1235458.

52. Cai Y, He X, Cui PL, Liu J, Li ZB, Jia BJ, et al. Preparation of a chemiluminescence sensor for multi-detection of benzimidazoles in meat based on molecularly imprinted polymer. Food chemistry. 2019;280:103-9.

53. Stevenson HS, Shetty SS, Thomas NJ, Dhamu VN, Bhide A, Prasad S. Ultrasensitive and rapid-response sensor for the electrochemical detection of antibiotic residues within meat samples. ACS omega. 2019;4(4):6324-30.

54. Holman BW, Kerry JP, Hopkins DL. A review of patents for the smart packaging of meat and muscle-based food products. Recent patents on food, nutrition & agriculture. 2018;9(1):3-13.

55. Wang Y, Zhang L, Peng D, Xie S, Chen D, Pan Y, et al. Construction of electrochemical immunosensor based on gold-nanoparticles/carbon nanotubes/chitosan for sensitive determination of T-2 toxin in feed and swine meat. International Journal of Molecular Sciences. 2018;19(12):3895.

56. Eyvazi S, Baradaran B, Mokhtarzadeh A, de la Guardia M. Recent advances on development of portable biosensors for monitoring of biological contaminants in foods. Trends in Food Science & Technology. 2021;114:712-21.

57. Habimana JdD, Ji J, Sun X. Minireview: trends in optical-based biosensors for point-of-care bacterial pathogen detection for food safety and clinical diagnostics. Analytical Letters. 2018;51(18):2933-66.

58. Kundu M, Krishnan P, Kotnala R, Sumana G. Recent developments in biosensors to combat agricultural challenges and their future prospects. Trends in food science & technology. 2019;88:157-78.

59. Malhotra S, Verma A, Tyagi N, Kumar V. Biosensors: principle, types and applications. Int J Adv Res Innov Ideas Educ. 2017;3(2):3639-44.

60. Ruiz-Valdepenas Montiel V, Gutiérrez ML, Torrente-Rodríguez RM, Povedano E, Vargas E, Reviejo AJ, et al. Disposable amperometric polymerase chain reaction-free biosensor for direct detection of adulteration with horsemeat in raw lysates targeting mitochondrial DNA. Analytical chemistry. 2017;89(17):9474-82.

61. Wang W, Zhu X, Teng S, Xu X, Zhou G. Development and validation of a surface plasmon resonance biosensor for specific detection of porcine serum albumin in food. Journal of AOAC International. 2018;101(6):1868-72.

62. Vanegas DC, Gomes CL, Cavallaro ND, Giraldo-Escobar D, McLamore ES. Emerging biorecognition and transduction schemes for rapid detection of pathogenic bacteria in food. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2017;16(6):1188-205.

63. Shin JH, Reddy YVM, Park TJ, Park JP. Recent advances in analytical strategies and microsystems for food allergen detection. Food chemistry. 2022;371:131120.

64. Nnachi RC, Sui N, Ke B, Luo Z, Bhalla N, He D, et al. Recent progress on biosensors for rapid detection of bacterial pathogens in water, food and environment. Environment international. 2022:107357.

65. Bhavadharini B, Kavimughil M, Malini B, Vallath A, Prajapati HK, Sunil C. Recent advances in biosensors for detection of chemical contaminants in food—a review. Food Analytical Methods. 2022;15(6):1545-64.

66. Shukla V, Kandeepan G, Vishnuraj M. Development of on package indicator sensor for real-time monitoring of meat quality. Veterinary world. 2015;8(3):393.

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

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

68. Yousefi H, Su H-M, Imani SM, Alkhaldi K, M. Filipe CD, Didar TF. Intelligent food packaging: A review of smart sensing technologies for monitoring food quality. ACS sensors. 2019;4(4):808-21.

69. Choi I, Lee JY, Lacroix M, Han J. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. Food chemistry. 2017;218:122-8.

70. Das J, Mishra HN. Recent advances in sensors for detecting food pathogens, contaminants, and toxins: A review. European Food Research and Technology. 2022;248(4):1125-48.

71. Vedove TM, Maniglia BC, Tadini CC. Production of sustainable smart packaging based on cassava starch and anthocyanin by an extrusion process. Journal of Food Engineering. 2021;289:110274.

72. Dudnyk I, Janeček E-R, Vaucher-Joset J, Stellacci F. Edible sensors for meat and seafood freshness. Sensors and Actuators B: Chemical. 2018;259:1108-12.

73. Zhai X, Zou X, Shi J, Huang X, Sun Z, Li Z, et al. Amine-responsive bilayer films with improved illumination stability and electrochemical writing property for visual monitoring of meat spoilage. Sensors and Actuators B: Chemical. 2020;302:127130.

74. Zhou X, Yu X, Xie F, Fan Y, Xu X, Qi J, et al. pH-responsive double-layer indicator films based on konjac glucomannan/camellia oil and carrageenan/anthocyanin/curcumin for monitoring meat freshness. Food Hydrocolloids. 2021;118:106695.

75. Zhang P, Li Y, Chong S, Yan S, Yu R, Chen R, et al. Identification and quantitative analysis of anthocyanins composition and their stability from different strains of Hibiscus syriacus L. flowers. Industrial Crops and Products. 2022;177:114457.

76. Niu X, Wang W, Kitamura Y, Wang J, Sun J, Ma Q. Design and characterization of bio-amine responsive films enriched with colored potato (Black King Kong) anthocyanin for visual detecting pork freshness in cold storage. Journal of Food Measurement and Characterization. 2021;15(5):4659-68.

77. Chayavanich K, Thiraphibundet P, Imyim A. Biocompatible film sensors containing red radish extract for meat spoilage observation. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2020;226:117601.

78. Kuntzler SG, Costa JAV, Brizio APDR, de Morais MG. Development of a colorimetric pH indicator using nanofibers containing Spirulina sp. LEB 18. Food chemistry. 2020;328:126768.

79. Sun Y, Zhang M, Adhikari B, Devahastin S, Wang H. Double-layer indicator films aided by BP-ANN-enabled freshness detection on packaged meat products. Food Packaging and Shelf Life. 2022;31:100808.

80. Yildiz E, Sumnu G, Kahyaoglu LN. Monitoring freshness of chicken breast by using natural halochromic curcumin loaded chitosan/PEO nanofibers as an intelligent package. International Journal of Biological Macromolecules. 2021;170:437-46.

81. Kanatt SR. Development of active/intelligent food packaging film containing Amaranthus leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. Food Packaging and Shelf Life. 2020;24:100506.

82. Shariatinia Z, Jalali AM. Chitosan-based hydrogels: Preparation, properties and applications. International journal of biological macromolecules. 2018;115:194-220.

.

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]

A review of biological sensors and chemical identifiers for quality and safety monitoring of meat and meat products

Bahareh Nowruzi [1*], Neda Farhoudi fard [1], Sogol Gharooni fard [1]

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Abstract

Ensuring the quality and safety of meat products requires rapid measures to prevent the development and spread of food-borne diseases. Although standard microbiological methods and conventional analytical techniques are available to monitor food safety and quality, these methods are often time-consuming and require experts with advanced skills and tools. Therefore, the urgent need to develop simple and fast tools is always felt to monitor the quality of meat and meat products in the production cycle in a short time. Biosensors and chemical identifiers are important tools for monitoring and controlling the quality of meat products due to their high sensitivity, specialization, reproducibility and stability. In this review article, the use of biosensors in the meat industry and their important role in determining meat quality are discussed. In addition, the role of different biosensors on the identification and detection of pollutants, counterfeit products, pathogenic agents, antibiotics and drug residues in meat products is also summarized. The obtained findings indicate that the new generation of biosensors should be based on nanomaterials that can be used in the food industry, especially in the meat processing sector, with high sensitivity and quick response.

Keywords: biosensors, fresh meat, quality control, pollutants, pathogens.

* bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

[Downloaded from amfi.ir on 2025-08-01]