ارائه چارچوب نانوزیست‌فناورانه برای بسته‌بندی هوشمند و فعال مواد غذایی با هدف پایش و پیش‌بینی فساد

زهرا ملکی [*۱]، کیانا کبریتی [۲]، محمدجواد شکوری [۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

zahra.maleki2906@iau.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Kiana.kebriti@iau.ac.ir

۳- استادیار،گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ،

mj.shakori@gmail.com

چکیده

گسترش مصرف غذاهای کم‌فرآوری‌شده، افزایش الزامات ایمنی و بهداشت مواد غذایی و پیامدهای زیست‌محیطی پلیمرهای نفت‌پایه، توسعه نسل نوینی از سامانه‌های بسته‌بندی را ضروری ساخته است. بسته‌بندی‌های نوین با بهره‌گیری از نانوفناوری قادرند از یک پوشش صرفاً غیرفعال به بستری چندمنظوره جهت حفظ کیفیت، مهار رشد میکروبی، پایش برخط و پیش‌بینی وضعیت فساد تبدیل شوند. پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی نانوزیست‌فناورانه جهت یکپارچه‌سازی نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه، نانو زیست‌حسگرها و سامانه‌های پاسخ‌گو تدوین شده است. روش این پژوهش، مرور تحلیلی و مدل‌سازی مفهومی دستاوردهای اخیر در حوزه نانومواد غذایی، حسگرهای رنگ‌سنجی، سامانه‌های رهایش هوشمند و ملاحظات سم‌شناسی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تلفیق زیست‌پلیمرها با نانوفیلرها ضمن تقویت خواص مکانیکی و ممانعتی، بستر مناسبی برای تثبیت عناصر فعال زیستی و پروب‌های حسگری فراهم می‌آورد. بر این اساس، چارچوبی یکپارچه در قالب پنج لایه عملکردی شامل ماتریس زیست‌پایه، نانوکامپوزیت عملکردی، لایه حسگری، واحد پاسخ‌گو و لایه تحلیل و پیش‌بینی ارائه شد. در این سامانه، داده‌های دریافتی از حسگرها امکان پایش لحظه‌ای و پیش‌بینی روند زوال کیفی محصول را با رویکردی داده‌محور میسر می‌سازد. در نهایت، الزامات گذار از مقیاس آزمایشگاهی به تجاری‌سازی شامل ارزیابی مهاجرت نانومواد، ایمنی زیستی، پایداری عملکردی و سازگاری با مقررات نظارتی تبیین شده است. این چارچوب می‌تواند نقشه‌راهی برای طراحی بسته‌بندی‌های پایدار، هوشمند و داده‌محور در صنایع غذایی باشد.

کلمات کلیدی: بسته‌بندی هوشمند و فعال، نانوزیست‌فناوری، نانوکامپوزیت زیست‌پایه، نانو زیست‌حسگر، پیش‌بینی فساد، ایمنی غذایی.

۱. مقدمه

بسته‌بندی مواد غذایی در گذشته عمدتاً با هدف ایجاد یک مانع فیزیکی غیرفعال میان محصول و محیط پیرامون طراحی می‌شد تا از نفوذ اکسیژن، بخار آب، نور و عوامل مکانیکی جلوگیری کند و سرعت زوال کیفی را کاهش دهد. با این حال، گسترش زنجیره تأمین مواد غذایی، افزایش مسافت و زمان حمل‌ونقل، تمایل فزاینده مصرف‌کنندگان به محصولات کم‌فرآوری‌شده و ضرورت حیاتی کاهش ضایعات، کارایی بسته‌بندی‌های سنتی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. در رویکردهای نوین، بسته‌بندی از یک پوشش خنثی به یک سامانه عملکردی پویا تبدیل شده است که توانایی برهم‌کنش با محصول و محیط پیرامون، پایش شاخص‌های فساد و حتی تغییر عملکرد در پاسخ به محرک‌های محیطی را داراست [۱, ۴, ۶]. ظهور نانوفناوری افق‌های نوینی را در طراحی این سامانه‌ها گشوده است؛ نسبت سطح به حجم بسیار بالا، ابعاد نانومتری و قابلیت اصلاح و عامل‌دار کردن سطحی نانومواد، امکان بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، ممانعتی، ضدمیکروبی و حسگری را حتی در درصدهای وزنی پایین فراهم می‌سازد. در این راستا، نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه که از تلفیق زیست‌پلیمرها با نانوفیلرها تشکیل می‌شوند، به‌عنوان گزینه‌ای تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیر جهت کاهش وابستگی به پلیمرهای سنتزی سنتز شده‌اند [۲, ۳, ۵]. افزودن نانورس‌ها، نانوسلولز، نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی می‌تواند نقایص ذاتی فیلم‌های زیست‌پلیمر نظیر نفوذپذیری بالا به گازها و ضعف مکانیکی را به طور مؤثری جبران نماید [۲, ۳, ۱۴].

با این حال، بسته‌بندی‌های نسل جدید افزون بر استحکام ساختاری، نیازمند پایش وضعیت سلامت ماده غذایی هستند؛ مفهومی که تحت عنوان بسته‌بندی هوشمند شناخته می‌شود. این سامانه‌ها اطلاعات کیفی و شرایط نگهداری محصول را پایش کرده و به علائم قابل تفسیر تبدیل می‌کنند [۱, ۴]. ادغام نانو زیست‌حسگرها (نوری، الکتروشیمیایی و پیزوالکتریک) بر پایه نانوذرات فلزی، نانوساختارهای کربنی و نانوآنزیم‌ها، حساسیت و حد تشخیص فساد را به میزان چشمگیری بهبود بخشیده است [۷, ۹]. در مقابل، بسته‌بندی فعال با جذب یا آزادسازی ترکیبات فعال (مانند آنتی‌اکسیدان‌ها، گازها و عوامل ضدمیکروبی)، محیط درونی بسته را تعدیل می‌کند. امروزه تلفیق این دو رویکرد به پیدایش بسته‌بندی‌های پاسخ‌گو و محرک‌پذیر منجر شده است که در آنها رهایش ترکیبات فعال تنها در پاسخ به محرک‌های اختصاصی فساد (مانند تغییرات pH، افزایش رطوبت یا گازهای آمینی) فعال می‌شود؛ سازوکاری که کارایی محافظتی را به حداکثر رسانده و مصرف بی‌رویه مواد فعال را مهار می‌نماید [۴, ۶].

با وجود این پیشرفت‌ها، بخش عمده‌ای از ادبیات پژوهشی به صورت تک‌بعدی صرفاً به سنتز نانوکامپوزیت‌ها، طراحی حسگرها یا فرمولاسیون سامانه‌های فعال پرداخته و از ارائه یک نگاه سیستمی و یکپارچه بازمانده‌اند [۲, ۴, ۵, ۷]. پژوهش حاضر با هدف رفع این شکاف مفهومی، چارچوبی نانوزیست‌فناورانه و پنج‌لایه‌ای برای سامانه‌های بسته‌بندی نسل نوین ارائه می‌دهد که در آن نانوکامپوزیت زیست‌پایه بستر ساختاری، نانو زیست‌حسگر واحد ادراک، سامانه پاسخ‌گو واحد عملگر و الگوریتم‌های تحلیلی لایه تصمیم‌یار را تشکیل می‌دهند.

۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع مطالعات مروری-تحلیلی با رویکرد ارائه چارچوب است. برخلاف مرورهای توصیفی که عمدتاً بر طبقه‌بندی رویدادمحور متمرکز هستند، در این مطالعه تلاش شده است تا ارتباط عملکردی و هم‌افزایی میان چهار رکن اصلی، شامل نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه، بسته‌بندی هوشمند، نانو زیست‌حسگرها و سامانه‌های پاسخ‌گو (محرک‌پذیر) تحلیل و تدوین گردد. در فرآیند تحلیل منابع، علاوه بر بررسی مشخصات فیزیکوشیمیایی نانومواد و ماتریس‌های پلیمری، شاخص‌های عملکردی شامل: خواص ضدمیکروبی، ویژگی‌های ممانعت ، حساسیت و حد تشخیص حسگرها، پایداری عملیاتی، قابلیت ادغام در لایه‌های بسته‌بندی و همچنین ملاحظات ایمنی (تغییرات مهاجرت نانومواد به ماده غذایی) مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی و سنتز منابع علمیِ منتشرشده در بازه سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۶ نشان می‌دهد که ادبیات این حوزه با شتابی فزاینده به سمت یکپارچه‌سازی فناوری‌های حسگری و سیستم‌های بسته‌بندی چندمنظوره حرکت کرده است. برای نمونه، مطالعات مروری اخیر در سال ۲۰۲۶ به‌طور ویژه بر قابلیت‌های نانو زیست‌حسگرها در تشخیص سریع پاتوژن‌ها، متابولیت‌های ناشی از فساد و آلاینده‌های غذایی، و نیز چالش‌های ادغام آن‌ها در ساختار بسته‌بندی تمرکز داشته‌اند [۷]. همچنین، پژوهش‌های کلیدیِ مشابه در سال ۲۰۲۶، هم‌افزایی نانوحسگرها با ترکیبات ضدمیکروبی و سامانه‌های ممانعتی پیشرفته را به‌عنوان محور اصلی نسل نوین بسته‌بندی‌های هوشمند-فعال معرفی کرده‌اند [۸]. این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل این داده‌ها، نقشه راه و چارچوب مفهومی پنج‌لایه‌ای مذکور را پیشنهاد می‌دهد.

۳. مبانی نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه در بسته‌بندی غذایی

نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه به سامانه‌های هیبریدی چندفازی اطلاق می‌شوند که در آن‌ها یک ماتریس زیست‌پلیمر تجدیدپذیر به‌عنوان فاز پیوسته، با فاز ناپیوسته تقویت‌کننده‌ای در ابعاد نانومتر (حداقل یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر) تلفیق می‌شود. ماتریس پلیمری زیستی می‌تواند از زیست‌پلیمرهای طبیعی متداول شامل پلی‌ساکاریدها (مانند نشاسته، کیتوسان، سلولز و مشتقات آن)، پروتئین‌ها (نظیر ژلاتین، کازئین و گلوتن)، و یا زیست‌پلیمرهای سنتزی/میکروبی زیست‌تخریب‌پذیر مانند پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHAs) تشکیل شود [۲, ۵]. با وجود مزایای زیست‌محیطی برجسته، بکارگیری زیست‌پلیمرهای خالص در صنعت بسته‌بندی با چالش‌های ساختاری عمده‌ای نظیر ضعف خواص مکانیکی (استحکام کششی پایین)، حساسیت بالا به رطوبت، و نفوذپذیری قابل‌توجه در برابر گازهای تنفسی (CO_2-O_2) و بخار آب مواجه است. ادغام فازهای تقویت‌کننده در مقیاس نانو از طریق ایجاد برهم‌کنش‌های قوی بین‌سطحی (پیوندهای هیدروژنی، الکترواستاتیک و نیروهای وان‌درووالسی) و بهبود انتقال بار بین‌سطحی، پایداری ساختاری را ارتقا می‌دهد. افزون بر این، حضور نانوفیلرها با ایجاد یک مسیر پرپیچ‌وخم در برابر نفوذ مولکول‌های کوچک، انتشار نفوذیافته‌ها را به‌طور چشمگیری کند کرده و خواص ممانعتی (Barrier properties) فیلم را بهینه‌سازی می‌نماید [۲, ۵, ۱۴].

در این راستا، مطالعه Perera و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده است که نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه نه تنها قادر به بهبود یکپارچگی مکانیکی و پایداری حرارتی هستند، بلکه می‌توانند به‌عنوان بستری کارآمد برای تثبیت عوامل ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی عمل کنند؛ اگرچه آن‌ها بر لزوم ارزیابی دقیق پدیده‌های مهاجرت، ارزیابی سمیت خلقی و الزامات سخت‌گیرانه نظارتی تأکید دارند [۲]. همچنین Mishra و همکاران (۲۰۲۵) کاربرد این نانوکامپوزیت‌ها را در سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند تبیین نموده و ارتقای هم‌زمان کارایی مکانیکی و ممانعتی زیست‌پلیمرها را اثبات کرده‌اند [۵].

در میان انواع نانوفیلرها، نانورس‌ها (مانند مونت‌موریلونیت) و نانومواد پایه سلولزی (نانوکریستال‌ها و نانوفیبریل‌ها) به دلیل نسبت ابعادی بالا و سطح ویژه بسیار گسترده، پتانسیل بالایی در ایجاد ساختارهای کاملاً لایه‌ای‌شده یا میان‌نشین در ماتریس پلیمری دارند که به تراکم ساختاری و کاهش نفوذپذیری می‌انجامد [۱۴]. با این وجود، پدیده کلوخه‌ای‌شدن و عدم سازگاری قطبی میان نانوذرات و ماتریس، از موانع اصلی در دست‌یابی به پراکنش یکنواخت به شمار می‌روند [۱۴]. از این رو، ارزیابی جامع یک نانوکامپوزیت زیست‌پایه برای کاربردهای حساس غذایی نباید صرفاً بر عملکرد ضدمیکروبی یا مقاومت مکانیکی متمرکز باشد، بلکه نیازمند رویکردی چندمعیاره شامل پایداری ساختاری، سینتیک رهایش، نرخ مهاجرت نانومواد به بافت ماده غذایی، زیست‌سازگاری و قابلیت قابلیت مقیاس‌پذیری صنعتی است.

۴. نانومواد عملکردی و نقش آنها در بسته‌بندی فعال

بسته‌بندی فعال با هدف برهم‌کنش پویا میان ماده غذایی، فضای فوقانی بسته و محیط پیرامون طراحی می‌شود تا از طریق مهار فساد میکروبی و واکنش‌های اکسیداسیونی، ماندگاری محصول را افزایش دهد. در این میان، نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی از برجسته‌ترین نانومواد عملکردی مورد استفاده در این سامانه‌ها به شمار می‌روند. نانوذرات نقره، نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل طیف گسترده فعالیت ضدمیکروبی علیه باکتری‌های گرم‌مثبت، گرم‌منفی و قارچ‌های عامل فساد به‌طور گسترده مورد پژوهش قرار گرفته‌اند [۳, ۱۳].

سازوکارهای بیوشیمیایی حاکم بر فعالیت ضدمیکروبی این نانوساختارها عمدتاً شامل سه پدیده هم‌افزا است:

۱. برهم‌کنش مستقیم بار الکتریکی با دیواره و غشای فسفولیپیدی سلول که منجر به تغییر نفوذپذیری غشا، تخریب ساختاری و خروج محتویات درون‌سلولی می‌شود؛
۲. تولید گونه‌های فعال اکسیژن نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل و یون‌های سوپراکسید، به‌ویژه در اثر فعالیت نورکاتالیزگری دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی، که اکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و شکست زنجیره‌های وراثتی میکروارگانیسم‌ها را در پی دارد؛
۳. آزادسازی مهارشده یون‌های فعال فلزی نقره یا روی و تداخل آن‌ها با آنزیم‌های تنفسی و متابولیکی سلول [۳, ۱۳].

با وجود پتانسیل بالای این نانومواد، کاربرد آن‌ها در مواد در تماس با غذا با چالش‌های ایمنی مصرف‌کننده و زیست‌پذیری مواجه است. پدیده نفوذ و مهاجرت نانوذرات یا یون‌های حاصل از انحلال آن‌ها به بافت ماده غذایی، نیازمند کنترل دقیق نرخ انتشار و رعایت دقیق حدود مجاز مهاجرت ویژه طبق استانداردهای نظارتی است. بر این اساس، مطالعات مروری تأکید می‌کنند که صرفِ داشتن فعالیت ضدمیکروبی بالا معیاری کافی برای صنعتی‌سازی نبوده و ارزیابی سمیت‌شناسی سلولی، ارزیابی خطرپذیری درازمدت و پایداری ساختار در شرایط نگهداری واقعی باید به‌صورت یکپارچه در فرایند طراحی لحاظ شوند [۲, ۳, ۱۴]. در پاسخ به این چالش‌ها و به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی و باقیمانده‌های سنتزی پرخطر، رویکرد سنتز سبز و زیستی نانومواد توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. بهره‌گیری از عصاره‌های گیاهی سرشار از ترکیبات پلی‌فنولی، فلاونوئیدی و ترپنوئیدی، یا ترشحات زیستی ریزسازواره‌ها، این امکان را فراهم می‌سازد که مولکول‌های زیستی به‌طور هم‌زمان نقش عوامل احیاکننده و عوامل پایدارکننده و پوشش‌دهنده را ایفا کنند. این روش علاوه بر کاهش نیاز به حلال‌ها و واکنش‌گرهای شیمیایی خطرناک، سازگاری زیستی نانومواد را ارتقا داده و با اصول شیمی سبز و اقتصاد زیستی چرخشی کاملاً هم‌راستا است [۱۳]. در همین راستا، مطالعه مروری آناند و همکاران در سال ۲۰۲۶ نشان داده است که پیوند میان نانوفناوری سبز و نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه، راهکاری

امیدوارکننده برای توسعه نسل جدید بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی پایدار فراهم می‌سازد، مشروط بر آنکه پروتکل‌های استاندارد ارزیابی نفوذ و مهاجرت، ارزیابی ریسک و تطابق با الزامات سخت‌گیرانه قانونی از مراحل اولیه طراحی آزمایشگاهی پیاده‌سازی شوند [۱۳].

۵. نانو زیست‌حسگرها در بسته‌بندی هوشمند

مهم‌ترین وجه تمایز بسته‌بندی‌های نسل نوین از سامانه‌های فعال متداول، توانایی پایش پیوسته و دریافت اطلاعات برخط از وضعیت زیستی و شیمیایی محصول است. در این ساختار، حسگرهای زیستی و نانو زیست‌حسگرها به‌عنوان واحد ادراک و شناسایی سامانه عمل می‌کنند. این ادوات با تلفیق عناصر شناسایی‌کننده زیستی نظیر آنزیم‌ها، پادتن‌ها، آپتامرها، اسیدهای نوکلئیک و گیرنده‌های سلولی با بسترهای نانوساختار، امکان ردیابی فوق‌حساس و گزینش‌پذیر گونه‌های هدف را فراهم می‌سازند. بر پایه مطالعه مروری سونیکا و همکاران در سال ۲۰۲۶، نانو زیست‌حسگرهای حوزه ایمنی و کیفیت مواد غذایی بر اساس سازوکار تبدیل سیگنال عمدتاً در چهار دسته الکتروشیمیایی، نوری، پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌شوند. این سامانه‌ها برای آشکارسازی سریع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، متابولیت‌های ناشی از فساد زیستی، گازهای متصاعدشده و سموم شیمیایی طراحی شده‌اند [۷]. نانوساختارهای فلزی، مواد پایه کربنی و شبه‌آنزیم‌های نانویی به‌دلیل فراهم‌سازی نسبت سطح به حجم بسیار بالا، تسریع در انتقال الکترون و قابلیت اصلاح سطحی برای تثبیت پایدار مولکول‌های زیستی، نقشی اساسی در تقویت سیگنال‌های حسگری و کاهش چشمگیر حد تشخیص ایفا می‌کنند [۷،۹].

از کاربردهای راهبردی نانو زیست‌حسگرها، پایش فرآیندهای دگرگونی و فساد در محصولات غنی از پروتئین است. هم‌زمان با رشد باکتری‌های عامل فساد و فعالیت آنزیم‌های درون‌زاد، غلظت ترکیبات نیتروژنی فرار نظیر آمونیاک و آمین‌های فرار کل در فضای فوقانی بسته به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد؛ این تغییرات به‌عنوان شاخص‌های غیرمستقیم و بسیار دقیق جهت سنجش درجه تازگی فرآورده عمل می‌کنند. در این چارچوب، بهره‌گیری از رنگدانه‌های طبیعی حساس به تغییرات اسیدیته و گازهای فرار جایگاه ویژه‌ای یافته است. مطالعه عابدی فیروزجاه و همکاران نشان داد که رنگدانه‌های طبیعی بتالائین به سبب حساسیت طیف‌سنجی بالا به نوسانات اسیدیته محیطی و غلظت آمونیاک، گزینه‌ای بسیار مناسب برای تعبیه در ساختار فیلم‌های هوشمند هستند و می‌توانند تازگی و ایمنی محصولاتی همچون میگو، ماهی، گوشت مرغ و شیر را به‌صورت چشمی پایش نمایند [۱۰]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که دامنه بسته‌بندی هوشمند طیف گسترده‌ای را شامل می‌شود؛ از شناساگرهای رنگ‌سنجی زیست‌پایه ساده و کم‌هزینه که وضعیت سلامت غذا را مستقیماً به مصرف‌کننده نشان می‌دهند، تا نانو زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی پیشرفته که داده‌ها را جهت تحلیل‌های زنجیره تأمین به سامانه‌های دیجیتال ارسال می‌کنند.

۶. سامانه‌های پاسخ‌گو و رهایش کنترل‌شده

در بسته‌بندی‌های فعال سنتی، آزادسازی ترکیبات زیست‌فعال غالباً از سینتیک رهایش غیرفعال و با نرخ انتشار تقریباً ثابت تبعیت می‌کند. این سازوکار فاقد انعطاف، معایبی نظیر تخلیه زودهنگام ماده مؤثره در مراحل آغازین نگهداری یا عدم دسترسی به دوز اثربخش در زمان اوج‌گیری فعالیت‌های میکروبی را به همراه دارد. سامانه‌های پاسخ‌گو به محرک با دگرگون ساختن این منطق طراحی، فرآیند رهایش عوامل فعال را به تغییرات دینامیک ریزمحیط بسته مشروط می‌سازند. در این فناوری، پارامترهایی چون نوسانات اسیدیته محیطی، تغییرات دمایی، رطوبت نسبی، گازهای حاصل از تنفس بافتی یا ترکیبات آلی فرار ناشی از فساد، نقش محرک‌های شیمیایی و فیزیکی را برای فعال‌سازی سامانه ایفا می‌کنند [۴, ۶]. دو و همکاران در بررسی سامانه‌های پیشرفته بسته‌بندی نشان دادند که شبکه‌های پلیمری و نانوحامل‌های پاسخ‌گو قادرند متناسب با ویژگی‌های بیوشیمیایی ریزمحیط تغییر ساختار داده و انتشار مهارشده ماده فعال را تنها در شرایط بحرانی محقق سازند [۴]. همچنین، شو و همکاران در مطالعه سال ۲۰۲۵ با ارزیابی سازوکارهای نوین بسته‌بندی‌های پاسخ‌گو، بر ظرفیت این سامانه‌ها در کاهش چشمگیر ضایعات غذایی و بیشینه‌سازی زمان ماندگاری تأکید کرده‌اند [۶].

تلفیق بخش‌های حسگری و محرک‌پذیر، بستری نوین برای ایجاد یک حلقه بازخورد بسته و خودتنظیم‌گر درون بسته فراهم می‌آورد. در این چرخه، وقوع هرگونه دگرگونی در کیفیت فرآورده ابتدا توسط لایه حسگر زیستی شناسایی شده و سیگنال حاصل، محرک لازم را برای تغییرات ساختاری در نانوساختارهای پاسخ‌گو (مانند تورم شبکه پلیمری، تغییر بار سطحی یا باز شدن دروازه‌های نانوقفس‌ها) فراهم می‌کند. در نتیجه، مواد نگهدارنده و ضدمیکروبی به شکل هدفمند در فضای بسته آزاد شده و محیط نگهداری را پیش از پیشرفت فساد به حالت پایدار بازمی‌گردانند. این پیوند یکپارچه میان ادراک، تصمیم‌گیری و پاسخ‌دهی عملکردی، شالوده اصلی و محور مفهومی چارچوب پیشنهادی در این پژوهش را تشکیل می‌دهد[۱۳].

۷. چارچوب پیشنهادی نانوزیست‌فناورانه

بر پایه واکاوی نظام‌مند پیشینه پژوهش، شکاف بنیادین موجود در نسل‌های پیشین بسته‌بندی، گسستگی عملکردی میان خواص سدی، پایشگری کیفی و واکنش‌های حفاظتی بوده است. جهت رفع این چالش، پژوهش حاضر یک چارچوب معماری پنج‌لایه‌ای یکپارچه و چندمقیاسی را معرفی می‌کند. این الگو از پیوند هم‌افزای علوم پلیمر، نانومواد عملکردی، زیست‌حسگری و فناوری‌های داده‌محور شکل گرفته و بسته‌بندی را از یک پوشش منفعل فیزیکی به یک ریزسامانه هوشمند، خودتنظیم‌گر و پیش‌بین تبدیل می‌سازد[۱۲]. ساختار مفهومی و سلسله‌مراتبی این پنج لایه به شرح زیر تبیین می‌گردد:

۱ .لایه زیربنایی: ماتریس زیست‌پلیمر تجدیدپذیر

این لایه شالوده فیزیکی و مکانیکی سامانه را تشکیل می‌دهد و هدف آن حذف کامل پلیمرهای سنتزی مشتق از نفت و کاهش ردپای کربن است. ساختار این بستر از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر طبیعی یا زیست‌ساخته نظیر پلی‌لاکتیک‌اسید، کیتوسان، مشتقات نانوسلولزی، نشاسته گرمانرم، ژلاتین و پروتئین‌های گیاهی طراحی می‌شود. وظیفه اصلی این لایه، تأمین انعطاف‌پذیری، پایداری ابعادی و سازگاری زیستی کامل با ماده غذایی در طول چرخه نگهداری است، ضمن آنکه بستر پذیرنده و نگه‌دارنده برای تثبیت فازهای نانومتری در لایه‌های بعدی را فراهم می‌آورد[۱۰].

۲ .لایه میانی اول: نانوکامپوزیت پایدارکننده و سدگر عملکردی

با توجه به ضعف ذاتی پلیمرهای زیست‌پایه در برابر نفوذ رطوبت و اکسیژن، این لایه از طریق ادغام نانوساختارهای معدنی و آلی در ماتریس پلیمری شکل می‌گیرد. بهره‌گیری از نانوذرات سیلیکات لایه‌ای، نانوفیبرهای سلولزی و نانوذرات اصلاح‌شده سطحی، با ایجاد مسیرهای پرپیچ‌وخم نفوذ، انتقال گازها و بخار آب را به حداقل ممکن می‌رساند. هم‌زمان، حضور نانومواد زیست‌سازگار با فعالیت ضدمیکروبی و مهارکنندگی اکسیداسیون، این لایه را به یک سنگر دفاعی پیوسته علیه تهاجم عوامل بیرونی و افت کیفیت بافت غذا تبدیل می‌کند[۱۲].

۳ .لایه میانی دوم: واحد نانو زیست‌ادراک و نشانگرهای زیست‌شیمیایی

این لایه به‌عنوان حسگر هوشیار و واحد پایش برخط سامانه عمل می‌کند و با تماس مستقیم یا برهم‌کنش با فضای فوقانی بسته، دگرگونی‌های میکروبی و شیمیایی ماده غذایی را به‌صورت آنی ردیابی می‌نماید. عملکرد این لایه بر پایه تثبیت گزینش‌پذیر زیست‌مولکول‌های شناسایی‌کننده نظیر آنزیم‌ها، پادتن‌ها، گیرنده‌های زیستی یا پروب‌های طیف‌سنجی حساس به اسیدیته و رنگدانه‌های طبیعی استوار است. ترکیبات فرار نیتروژنی، گازهای تنفسی، نوسانات اسیدیته ناشی از رشد باکتریایی و متابولیت‌های ویژه فساد در این لایه با دقت فوق‌العاده بالا و با تقویت سیگنال ناشی از نانوساختارها به داده‌های قابل پردازش تبدیل می‌شوند[۱۵].

۴ .لایه میانی سوم: سامانه محرک‌پذیر و رهایش بازخوردی

این لایه قلب تپنده بخش فعال سامانه است که منطق بازخورد بسته و پاسخ هوشمند را پیاده‌سازی می‌کند. بر خلاف سیستم‌های سنتی با رهایش کور، این بخش از شبکه‌های پلیمری با پیوندهای پاسخ‌گو به محرک‌های شیمیایی و فیزیکی تشکیل شده است. با دریافت سیگنال بیوشیمیایی ناشی از آغاز فساد از لایه حسگر (نظیر افت یا افزایش اسیدیته یا تجمع گازهای فرار)، نانوحامل‌های هوشمند دچار تغییرات صورتبندی، تورم یا باز شدن منافذ شده و مواد ضدمیکروبی، پپتیدهای زیست‌فعال یا مهارکننده‌های زیستی را دقیقاً در دوز مورد نیاز و در موضع بحرانی آزاد می‌سازند تا پیشروی فساد متوقف گردد[۱۵].

۵ .لایه فوقانی: تحلیل داده، اتصال دیجیتال و پیش‌بینی پویای کیفیت

عالی‌ترین سطح چارچوب پیشنهادی، پیوند فیزیکی بسته با دنیای دیجیتال و زنجیره ارزش هوشمند است. در این لایه، سیگنال‌های دریافتی از نانو زیست‌حسگرها (خواه از طریق پردازش تصویر تغییرات رنگ‌سنجی توسط تلفن‌های همراه و خواه از طریق ریزتراشه‌های بدون باتری و برچسب‌های شناسایی با امواج رادیویی) به پایگاه داده ابری انتقال می‌یابند. در این سطح، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی پیشرفته، همبستگی میان تغییرات حسگری، تاریخچه دما و رطوبت در طول زنجیره سرد و نرخ زوال کیفی تحلیل می‌شود. در نتیجه، سامانه قادر است از سطح منفعلِ اعلام وقوع فساد فراتر رفته و به قابلیت فعالِ پیش‌بینی زمان دقیق ماندگاری و پایش پویای کیفیت دست یابد.

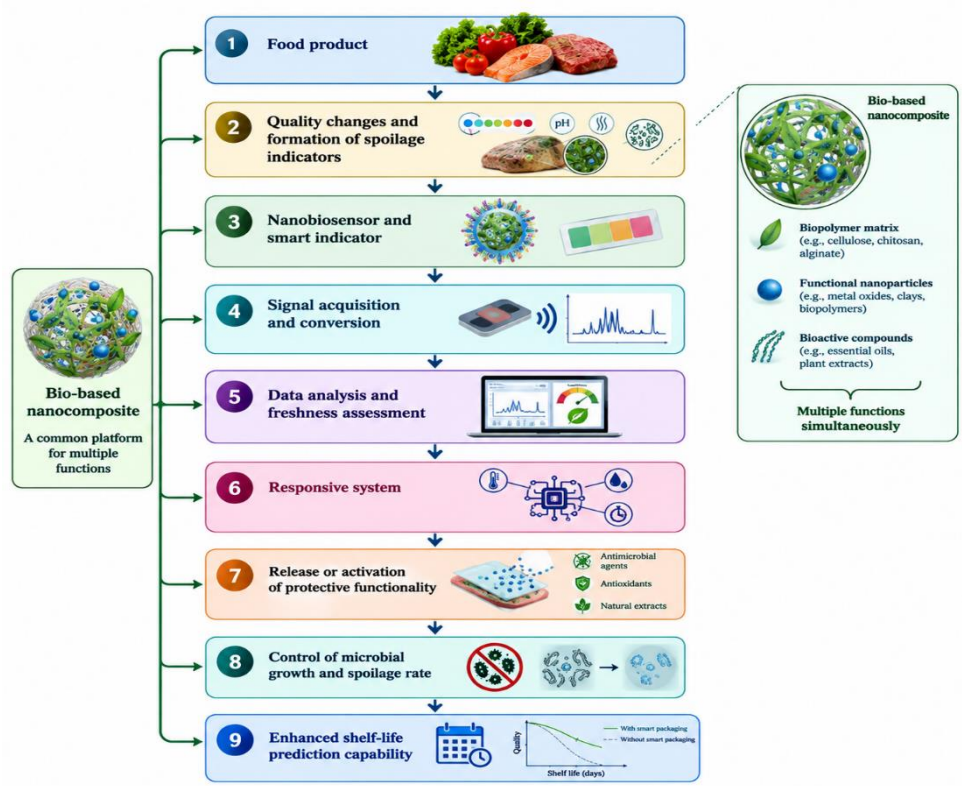


Figure 1. Conceptual Architecture of the Proposed Nanobiotechnological Framework for Smart and Active Food Packaging

In this architecture, the bio-based nanocomposite serves as a common platform capable of providing multiple functions simultaneously.

شکل ۱-معماری مفهومی چارچوب نانوزیست‌فناورانه پیشنهادی برای بسته‌بندی هوشمند و فعال مواد غذایی

۸. مقایسه اجزای فناوری پیشنهادی

پس از تبیین معماری پنج‌لایه، ضروری است هر جزء فناوری به‌صورت جداگانه از منظر «کارکرد اصلی»، «نمونه‌های مادی»، «خروجی مورد انتظار» و «گلوگاه یا چالش کلیدی» ارزیابی شود. منطق این مقایسه بر یک واقعیت اساسی در طراحی سامانه‌های بسته‌بندی پیشرفته استوار است: هیچ جزء واحدی به‌تنهایی نمی‌تواند همه الزامات هم‌زمان کارایی، ایمنی و پایداری را برآورده سازد؛ ازاین‌رو ارزش هر جزء نه در برتری مطلق، بلکه در نقش مکمل و هم‌افزایش با سایر لایه‌ها تعریف می‌شود. جدول زیر این نگاشت عملکردی را در سطح مقایسه‌ای نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه عملکردی اجزای اصلی چارچوب پیشنهادی

جزء فناوری	عملکرد اصلی	نمونه مواد	خروجی مورد انتظار	چالش اصلی
ماتریس زیست‌پایه	ایجاد ساختار بسته‌بندی	نشاسته، کیتوسان، سلولز، ژلاتین، PLA	زیست‌تخریب‌پذیری و تشکیل فیلم	ضعف برخی خواص مکانیکی و ممانعتی
نانوکامپوزیت	تقویت عملکرد ساختاری	نانوسلولز، نانورس، TiO_2 ،Ag ،ZnO	افزایش استحکام و عملکرد ممانعتی	مهاجرت و سمیت
نانوماده ضدمیکروبی	کنترل میکروبی	TiO_2 ،ZnO ،Ag	کاهش رشد میکروبی	دوز، مهاجرت و ایمنی
نانو زیست‌حسگر	تشخیص شاخص کیفیت	نانوذرات فلزی، مواد کربنی، نانوآنزیم‌ها	تشخیص سریع فساد یا آلودگی	پایداری و انتخاب‌پذیری
نشانگر رنگ‌سنجی	ارائه هشدار دیداری	بتالائین، آنتوسیانین	تغییر رنگ	پایداری رنگدانه
سامانه پاسخ‌گو	واکنش به محرک	پلیمرهای پاسخ‌گو و حامل‌های نانویی	رهایش کنترل‌شده	پیچیدگی طراحی
تحلیل هوشمند	پیش‌بینی وضعیت	الگوریتم‌های ML	پیش‌بینی روند فساد	نیاز به داده معتبر

خوانش دقیق جدول فوق یک الگوی تکرارشونده را آشکار می‌سازد: هرچه یک جزء از نظر کارکرد فنی قدرتمندتر باشد، فشار محدودیت‌ها بر آن بیشتر می‌شود. ماتریس زیست‌پایه بالاترین امتیاز پایداری زیست‌د. نانوکامپوزیت‌ترین کارایی سدی را نشان می‌دهد. نانوکامپوزیت این ضعف را جبران می‌کند، اما خود در معرض پرسش‌های مهاجرت و سم‌شناسی قرار می‌گیرد. نانومواد ضدمیکروبی بیشترین اثربخشی زیستی را ارائه می‌دهند ولی دوز و ایمنی، سخت‌ترین قید نظارتی آن‌ها است. نشانگرهای رنگ‌سنجی زیست‌پایه از نظر هزینه، سادگی و دسترس‌پذیری برترین گزینه‌اند، اما پایداری رنگدانه در برابر نور، دما و رطوبت، ضعف ساختاری آن‌ها محسوب می‌شود. سامانه پاسخ‌گو بالاترین پیچیدگی عملکردی را دارد و در مقابل، پیچیدگی طراحی و مقیاس‌پذیری صنعتی، گلوگاه اصلی آن است. در نهایت، لایه تحلیل هوشمند بیشترین ارزش افزوده اطلاعاتی را ایجاد می‌کند، مشروط بر آنکه داده‌های حسگری از نظر حجم، دقت و اعتبار آماری کافی باشند[۱۳،۱۴].

این همبستگی معکوس میان کارایی و ایمنی، در ادبیات طراحی سامانه‌های بسته‌بندی به‌عنوان «مبادله بنیادین» شناخته می‌شود. راهبرد چارچوب پیشنهادی در مواجهه با این مبادله، نه بهینه‌سازی یک جزء به بهای تضعیف اجزای دیگر، بلکه «توزیع هوشمند عملکرد» است. به بیان دیگر، بار ممانعتی از ماتریس به نانوکامپوزیت منتقل می‌شود، بار کنترل میکروبی از دوز بالای نانومواد به رهایش مشروط و هدفمند سپرده می‌شود، و بار پایش از سامانه‌های الکترونیکی پیچیده به نشانگرهای زیست‌پایه ارزان و در دسترس واگذار می‌گردد. نتیجه این تقسیم کار، کاهش دوز مصرفی نانومواد، کاهش خطر مهاجرت و در عین حال حفظ یا ارتقای کارایی کل سامانه است. ماتریس زیست‌پایه و نانوکامپوزیت، به‌ترتیب مسئولیت لایه اول و دوم را بر عهده دارند. نانومواد ضدمیکروبی در مرز میان لایه دوم و چهارم عمل می‌کنند؛ زیرا هم بخشی از بار ممانعتی را حمل می‌کنند و هم ذخیره‌گاه ماده فعال برای رهایش محرک‌پذیر هستند. نانو زیست‌حسگر و نشانگر رنگ‌سنجی دو سطح متفاوت از لایه سوم را پوشش می‌دهند: سطح دقیق و کمّی در برابر سطح ساده، کیفی و مصرف‌کننده‌محور. سامانه پاسخ‌گو لایه چهارم را به‌طور کامل تحقق می‌بخشد و لایه تحلیل هوشمند، لایه پنجم را از یک ایده مفهومی به یک قابلیت عملیاتی تبدیل می‌کند. این نگاشت نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی نه مجموعه‌ای تصادفی از فناوری‌های نوین، بلکه یک تقسیم کار ساخت‌یافته میان اجزاست که در آن، ناکارآمدی هر جزء توسط قابلیت جزء مجاور جبران می‌شود. [۷،۸].

از منظر تجاری‌سازی، این مقایسه دو دلالت راهبردی دارد. نخست، مسیر توسعه باید مرحله‌ای و مبتنی بر بلوغ فناوری باشد؛ به‌گونه‌ای که سامانه‌های مبتنی بر نشانگر رنگ‌سنجی و ماتریس زیست‌پایه، به‌عنوان نسل در دسترس‌تر، پیش از سامانه‌های پیچیده پاسخ‌گو و داده‌محور به بازار عرضه شوند. دوم، ارزیابی مهاجرت و سم‌شناسی باید به‌عنوان یک الزام طراحی در هر مرحله و نه یک آزمون تأییدی نهایی، در نظر گرفته شود. با این رویکرد، چارچوب پیشنهادی از یک مدل مفهومی صرف فراتر رفته و به یک نقشه راه قابل اجرا برای توسعه نسل جدید بسته‌بندی مواد غذایی تبدیل می‌گردد[۱۰].

۹. همگرایی نانوکامپوزیت و نانو زیست‌حسگر

یکی از بنیادی‌ترین جنبه‌های نوآورانه در چارچوب پیشنهادی، بازتعریف رابطه میان «نانوکامپوزیت عملکردی» و «نانو زیست‌حسگر» از دو جز فیزیکی مستقل به اجزای یک ریزسامانه درهم‌تنیده و هم‌افزا است. در رویکردهای سنتی، فیلم پلیمری صرفاً عهده‌دار وظایف ممانعتی و فیزیکی بوده و واحد حسگری به‌شکل یک برچسب یا شناساگر مجزا در درون یا بیرون بسته الصاق می‌شده است. این جدایی ساختاری علاوه بر افزایش مراحل تولید و هزینه‌های اقتصادی، پایش برخط و بلادرنگ را با چالش‌های ترابرد جرمی مواجه می‌سازد. در مقابل، معماری مفهومی این مقاله بر مبنای ادغام ذاتی این دو کارکرد از نخستین گام‌های مهندسی ماتریکس استوار است؛ به‌گونه‌ای که بستر نانوکامپوزیتی هم‌زمان نقش اسکلت ممانعتی، بستر تثبیت عناصر زیست‌حسگری و محیط رهایش مشروط را ایفا نماید[۱۰].

این یکپارچه‌سازی سامانه‌ای، مزایای متعددی را به همراه دارد:

۱. **ساده‌سازی ساختار و ارتقای یکپارچگی زیستی:** با حذف حامل‌های جانبی و ادغام مستقیم نقاط حساس در ساختار فیلم، تعداد اجزای نامتجانس بسته کاهش یافته و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری کل سامانه حفظ می‌شود[۵].

۲. **بهینه‌سازی رابط واکنش در فضای بالاسری:** قرارگیری نانوحسگرها در بافت نانوکامپوزیت و در مجاورت بلافصل سطح ماده غذایی یا گازهای فرار متصاعد در فضای بالاسری، مسافت نفوذ متابولیت‌های فساد را به حداقل رسانده و زمان پاسخ حسگری را به شکل معناداری کوتاه می‌کند[۸].

۳. **مهندسی هم‌زمان ترابرد جرمی و گزینش‌پذیری:** شبکه متراکم و ساختار پیچ‌درپیچ ایجادشده توسط نانوذرات در ماتریکس پلیمری، می‌تواند افزون بر کاهش نفوذ اکسیژن و بخار آب، مانند یک فیلتر اندازه یا قطبیت عمل کرده و با مهار نفوذ مولکول‌های مزاحم، گزینش‌پذیری واحد حسگری را نسبت به متابولیت‌های هدف افزایش دهد[۱۰].

با این حال، یکپارچه‌سازی این دو فناوری بدون در نظر گرفتن «تداخل‌های متقابل ساختاری و کارکردی» امکان‌پذیر نخواهد بود. مهم‌ترین چالش‌های همگرایی عبارتند از:

- **تداخل در خواص نوری و میرایی سیگنال:** افزودن درصد بالایی از پرکننده‌های نانویی ممکن است شفافیت نوری ماتریکس را کاهش داده یا به پدیده کدرشدگی و شکست نامطلوب نور منجر شود؛ رخدادی که وضوح بازخوانی نشانگرهای رنگ‌سنجی یا طیف‌سنجی را مخدوش می‌سازد.
- **برهم‌کنش‌های نامطلوب بیوشیمیایی:** مواد فعال مهارکننده (مانند یون‌های فلزی یا ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در لایه فعال) می‌توانند با گروه‌های عاملی زیست‌مولکول‌های حسگر، گیرنده‌های زیستی یا نانوآنزیم‌ها واکنش داده و منجر به واسرشتگی یا خنثی‌سازی عملکرد تشخیصی آن‌ها شوند.
- **ناپایداری در فصل مشترک:** بار سطحی نانوذرات تقویت‌کننده و تغییرات ناشی از تورم ماتریس در مواجهه با رطوبت می‌تواند به جداشدگی فازی یا کلوخه‌ای‌شدن نانوحسگرها منجر شود.

ازاین‌رو، طراحی موفق یک سامانه همگرا مستلزم به‌کارگیری روش‌های «بهینه‌سازی هم‌زمان چندمعیاره» است؛ به‌گونه‌ای که متغیرهایی نظیر کسر حجمی نانومواد، نوع پوشش‌دهی سطحی، و شیمی فصل مشترک طوری تنظیم شوند که ارتقای خواص ممانعتی بدون آسیب به حساسیت حسگری و شفافیت دیداری حاصل گردد.

۱۰. نقش مواد طبیعی در بسته‌بندی هوشمند

یکی از روندهای مهم در توسعه بسته‌بندی‌های نسل جدید، استفاده از ترکیبات طبیعی به‌عنوان مواد فعال و حسگرهای رنگ‌سنجی است. رنگدانه‌های طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها و بتالائین‌ها به دلیل حساسیت نسبت به pH و برخی ترکیبات شیمیایی می‌توانند در تولید فیلم‌های هوشمند به کار روند. بتالائین‌ها نمونه مناسبی از این رویکرد هستند. مطالعه Abedi-Firoozjah و همکاران نشان داده است که فیلم‌های حاوی بتالائین می‌توانند نسبت به تغییرات pH و آمونیاک حساس باشند و در پایش تازگی محصولات پروتئینی استفاده شوند [۱۰]. این رویکرد با مفهوم زیست‌فناوری غذایی نیز سازگاری بالایی دارد، زیرا استخراج ترکیبات فعال از منابع گیاهی و زیستی و سپس تثبیت آنها در ماتریس‌های زیست‌پایه می‌تواند یک زنجیره ارزش جدید ایجاد کند. از منظر اقتصاد چرخشی، حتی می‌توان به استفاده از ترکیبات زیست‌فعال استخراج‌شده از پسماندهای کشاورزی و صنایع غذایی نیز توجه کرد. در این حالت، پسماند به‌عنوان منبع ترکیبات ارزشمند مورد استفاده قرار گرفته و در ساخت مواد عملکردی بسته‌بندی وارد می‌شود.

یکی از نقاط تمایز چارچوب پیشنهادی نسبت به بسیاری از سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند، افزودن لایه پیش‌بینی است. در بسته‌بندی هوشمند ساده، حسگر تنها وضعیت فعلی را گزارش می‌کند. برای مثال، تغییر رنگ نشانگر می‌تواند نشان دهد که محیط بسته از نظر pH یا ترکیبات فرار تغییر کرده است. اما در یک سامانه پیشرفته، داده حسگر می‌تواند همراه با اطلاعات دما، زمان نگهداری، رطوبت، نوع ماده غذایی و سایر متغیرها وارد یک مدل پیش‌بینی شود. مدل یادگیری ماشین می‌تواند رابطه میان این متغیرها و شاخص‌های کیفیت را یاد بگیرد و احتمال رسیدن محصول به یک آستانه کیفیت مشخص را پیش‌بینی کند. در نتیجه، عملکرد سامانه از تشخیص وضعیت موجود به پایش روند تغییر و در نهایت پیش‌بینی وضعیت آینده تکامل پیدا می‌کند. مطالعه Sonika و همکاران نیز در بخش چشم‌انداز آینده بر توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند پیش‌بینانه با کمک هوش مصنوعی تأکید کرده است [۷]. مرور جدید منتشرشده در Food Control نیز بسته‌بندی هوشمند را در مسیر گذار از سامانه‌های منفعل و تک‌عملکردی به سامانه‌هایی با قابلیت ادراک، پاسخ، ارتباط و یکپارچه‌سازی تحلیل می‌کند [۱۲].

قابلیت اجرای چارچوب پیشنهادی به نوع محصول وابسته است. در محصولات گوشتی و دریایی، ترکیبات فرار نیتروژنی و تغییرات pH می‌توانند اهداف مناسبی برای حسگر باشند. در این گروه، نشانگرهای رنگ‌سنجی و حسگرهای تشخیص آمین‌های فرار اهمیت بالایی دارند. در محصولات لبنی، تغییر pH، تولید اسیدهای آلی و رشد میکروبی می‌تواند مبنای طراحی حسگر قرار گیرد. در میوه و سبزی، تنفس، تغییرات گازهای داخل بسته و ترکیبات فرار می‌توانند در طراحی سامانه حسگری مورد استفاده قرار گیرند. در محصولات خشک، کنترل رطوبت، اکسیژن و اکسیداسیون اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، نمی‌توان یک حسگر واحد را برای همه محصولات غذایی به‌عنوان راه‌حل عمومی در نظر گرفت. طراحی سامانه باید مبتنی بر مسیر اصلی فساد هر محصول باشد.

جدول ۲. ارتباط نوع محصول با اهداف احتمالی سامانه هوشمند

گروه غذایی	شاخص‌های مهم فساد	نوع حسگر مناسب	عملکرد فعال احتمالی
گوشت	آمین‌های فرار، pH، بار میکروبی	رنگ‌سنجی، نانوحسگر	ضدمیکروبی
محصولات دریایی	آمونیاک، آمین‌ها، pH	نشانگر pH و نانو زیست‌حسگر	ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی
لبنیات	pH، اسیدیته، گاز	حسگر pH و گازی	کنترل رشد میکروبی
میوه و سبزی	O_2، CO_2، اتیلن، رطوبت	حسگر گازی	کنترل تنفس و رطوبت
محصولات چرب	اکسیداسیون، اکسیژن	حسگر اکسیژن و اکسیداسیون	آنتی‌اکسیدانی
محصولات خشک	رطوبت، اکسیژن	حسگر رطوبت و O_2	ممانعتی

۱۱. تحلیل شکاف پژوهشی

مرور مطالعات نشان می‌دهد که چهار شکاف اصلی همچنان وجود دارد. نخست، بسیاری از مطالعات بر تولید فیلم و اندازه‌گیری خواص فیزیکی تمرکز دارند، در حالی که ادغام هم‌زمان حسگر و عملکرد فعال کمتر توسعه یافته است. دوم، بخش قابل توجهی از مطالعات حسگری در شرایط آزمایشگاهی انجام شده است و انتقال آن به محیط واقعی بسته‌بندی و مواد غذایی هنوز چالش‌برانگیز است. مرور Sonika و همکاران نیز بر اهمیت آزمون در ماتریس واقعی غذا تأکید کرده است [۷]. سوم، ایمنی نانومواد همچنان یکی از موانع مهم تجاری‌سازی است. مهاجرت نانوذرات از بسته‌بندی به غذا، سمیت بالقوه و مواجهه طولانی‌مدت باید قبل از کاربرد گسترده بررسی شود [۲،۳،۱۳،۱۴]. چهارم، فاصله‌ای میان تشخیص و تصمیم‌گیری وجود دارد. یک حسگر ممکن است بتواند فساد را شناسایی کند، اما ارزش واقعی زمانی افزایش می‌یابد که داده حسگر بتواند برای تصمیم‌گیری درباره ادامه نگهداری، توزیع، مصرف یا حذف محصول مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر تلاش می‌کند این چهار شکاف را با اتصال مواد، حسگر، پاسخ و تحلیل داده کاهش دهد.

جدول ۳. شکاف‌های پژوهشی و راهکار پیشنهادی

شکاف	وضعیت غالب مطالعات	راهکار پیشنهادی
جدایی بسته‌بندی و حسگر	عملکردهای مستقل	ادغام حسگر در ساختار بسته
تشخیص به جای پیش‌بینی	هشدار پس از تغییر کیفیت	مدل‌سازی روند فساد
آزمون آزمایشگاهی	شرایط کنترل‌شده	اعتبارسنجی در غذای واقعی
تمرکز بر عملکرد فنی	توجه کمتر به ایمنی	طراحی مبتنی بر ایمنی
رهایش ثابت	مصرف غیرهدفمند ماده فعال	رهایش پاسخ‌گو
تمرکز بر یک عملکرد	ضدمیکروبی یا حسگری	طراحی چندمنظوره

استفاده از نانومواد در بسته‌بندی غذایی بدون ارزیابی ایمنی نمی‌تواند مبنای تجاری‌سازی قرار گیرد.

مهاجرت نانومواد ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند اندازه ذره، ساختار ماتریس، دما، زمان تماس، نوع غذا و ترکیب شیمیایی ماده غذایی قرار گیرد. به همین دلیل، آزمون مهاجرت باید برای شرایط واقعی یا شرایط استانداردشده مرتبط با کاربرد نهایی انجام شود.Perera و همکاران در بررسی نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه، مهاجرت و الزامات قانونی را از موضوعات مهم برای توسعه آینده معرفی کرده‌اند [۲]. همچنین بررسی نانورس‌ها نشان می‌دهد که اگرچه افزودن آنها می‌تواند خواص مکانیکی و ممانعتی را بهبود دهد، ارزیابی سمیت و مهاجرت همچنان ضروری است [۱۴]. در سامانه‌های دارای نانوذرات فلزی نیز باید میان فعالیت ضدمیکروبی و میزان مواجهه احتمالی مصرف‌کننده تعادل برقرار شود. بنابراین، اصل پیشنهادی در چارچوب حاضر، ایمنی در مرحله طراحی است. یعنی ارزیابی ایمنی نباید پس از توسعه ماده انجام شود، بلکه باید از مرحله انتخاب نانوماده، ماتریس و روش تثبیت آن در طراحی لحاظ شود.

اگرچه بسیاری از سامانه‌های نانوکامپوزیتی در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد مناسبی نشان داده‌اند، انتقال آنها به صنعت با چالش‌هایی همراه است. نخست، روش ساخت باید از نظر هزینه و سرعت تولید قابل قبول باشد. روش‌های آزمایشگاهی مانند برخی روش‌های پیچیده لایه‌نشانی یا ساخت حسگر ممکن است برای تولید انبوه مناسب نباشند. دوم، عملکرد حسگر

باید در طول عمر بسته‌بندی پایدار باقی بماند. تغییر رنگ یا سیگنال نباید تحت تأثیر نور، دما یا رطوبت محیط بدون ارتباط با فساد غذا قرار گیرد. سوم، سامانه باید در تماس با مواد غذایی از نظر ایمنی و الزامات قانونی قابل پذیرش باشد. چهارم، مصرف‌کننده باید بتواند پیام حسگر را به‌سادگی درک کند. یک سامانه بسیار پیچیده که خروجی آن برای مصرف‌کننده قابل تفسیر نیست، ممکن است مزیت عملی محدودی داشته باشد. مطالعات جدید نیز بر ضرورت استانداردسازی روش‌های آزمون، ارزیابی سمیت، کنترل مهاجرت، مقیاس‌پذیری و تدوین الزامات قانونی تأکید کرده‌اند [۷،۸،۱۳].

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که مسیر توسعه بسته‌بندی غذایی در حال تغییر از طراحی مواد منفرد به طراحی سامانه‌های چندعملکردی است. نانوکامپوزیت‌ها ظرفیت لازم برای تقویت ساختار بسته‌بندی را فراهم می‌کنند، نانومواد فعال می‌توانند عملکرد ضدمیکروبی یا آنتی‌اکسیدانی ایجاد کنند، حسگرها وضعیت محصول را دریافت می‌کنند و سامانه‌های پاسخ‌گو امکان واکنش به تغییرات محیطی را فراهم می‌سازند [۲،۳،۴،۵،۶]. با این حال، این اجزا در بسیاری از مطالعات هنوز به‌صورت جداگانه بررسی می‌شوند. مرورهای جدید ۲۰۲۶ نیز نشان می‌دهند که حوزه به سمت ادغام نانو زیست‌حسگرها، بسته‌بندی هوشمند، ارتباطات بی‌سیم و حتی تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی حرکت کرده است [۷،۸]. از این منظر، نوآوری اصلی چارچوب پیشنهادی نه معرفی یک نانوماده جدید، بلکه ایجاد یک معماری یکپارچه برای اتصال عملکردهای مختلف است.

این معماری از یک منطق حلقه‌بسته پیروی می‌کند. در ابتدای زنجیره، وضعیت ماده غذایی ایجادکننده سیگنال است. در مرحله بعد، حسگر سیگنال را دریافت می‌کند. سپس سامانه تحلیل وضعیت محصول را ارزیابی می‌کند. در صورت عبور از یک آستانه مشخص، سامانه پاسخ‌گو فعال می‌شود و عملکرد حفاظتی افزایش می‌یابد.

چنین معماری‌ای می‌تواند در آینده زمینه را برای توسعه بسته‌بندی‌هایی فراهم کند که تنها محافظ یا نشانگر نیستند، بلکه به سامانه‌های فعال مدیریت کیفیت تبدیل می‌شوند. از طرف دیگر، نباید نوآوری فناورانه را بدون توجه به ایمنی و امکان تجاری‌سازی ارزیابی کرد. اگر نانوماده از نظر مهاجرت یا سمیت قابل قبول نباشد، حتی عملکرد فنی بالا نیز به کاربرد صنعتی منجر نخواهد شد. بنابراین، ارزیابی ایمنی باید بخشی از معماری فناوری و نه یک مرحله پس از توسعه باشد.

۱۲. نتیجه‌گیری

فناوری نانوزیست‌فناوری دارای پتانسیل بنیادین برای ایجاد دگرگونی در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی است؛ با این حال، بیشترین کارایی و غنای عملکردی آن زمانی آشکار می‌گردد که نانوکامپوزیت‌های زیست‌پایه، نانو زیست‌حسگرها و سامانه‌های پاسخ‌گو به محرک، نه به‌صورت ابزارهای منفرد و مجزا، بلکه در قالب یک معماری ساخت‌یافته و یکپارچه طراحی و اجرا شوند. واکاوی جامع پیشینه پژوهش نشان داد که ماتریکس‌های پلیمری زیست‌پایه با تقویت نانومتری می‌توانند بر محدودیت‌های ساختاری و نفوذپذیری خود فایق آیند و نانومواد عملکردی نیز قادرند خواص ضدمیکروبی و مهارکنندگی اکسیداسیون بی‌بدیلی را فراهم سازند. در لایه ادراک، نانو زیست‌حسگرها و شناساگرهای رنگ‌سنجی طبیعی توانمندی بالایی در ردیابی زودهنگام میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، گازهای فرار نیتروژنی و دگرگونی‌های شیمیایی ارائه می‌دهند. هم‌زمان، سامانه‌های محرک‌پذیر با مشروط ساختن آزادسازی ترکیبات فعال به وضعیت بیوشیمیایی ریزمحیط، مفهوم بسته‌بندی فعال را از سینتیک رهایش غیرفعال به یک ریزسامانه هوشمند و خودتنظیم‌گر ارتقا می‌دهند.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با جمع‌بندی تحلیلی این قابلیت‌ها، یک چارچوب جامع پنج‌لایه‌ای متشکل از: ۱) ماتریکس زیست‌پایه تجدیدپذیر، ۲) نانوکامپوزیت پایدارکننده و سدگر، ۳) واحد نانو زیست‌ادراک و نشانگرهای کیفی، ۴) سامانه پاسخ‌گو و رهایش بازخوردی، و ۵) لایه تحلیل داده، اتصال دیجیتال و پیش‌بینی پویای کیفیت را پیشنهاد نمود. مزیت راهبردی این الگو، ایجاد یک زنجیره هم‌افزا میان «حفاظت فیزیکی-زیستی»، «ادراک بیوشیمیایی»، «پاسخ عملکردی در لحظه» و «پیش‌بینی الگوریتمی روند فساد» است. در این چارچوب مفهومی، گذار از «پایش منفعلانه یا اعلام دیرهنگام فساد» به سمت «پیش‌بینی فعالانه زمان ماندگاری»، نقشی کلیدی در بهینه‌سازی زنجیره سرد و کاهش چشمگیر ضایعات غذایی ایفا خواهد کرد. با این وجود، تجاری‌سازی و عملیاتی‌سازی این معماری نوآورانه مستلزم عبور از چالش‌های مهمی نظیر گردآوری داده‌های زیست‌حسگری معتبر، اعتبارسنجی عملکرد در ماتریس‌های پیچیده و واقعی غذایی، پایداری نشانگرهای زیستی، ارزیابی جامع دینامیک مهاجرت و سم‌شناسی، مقیاس‌پذیری اقتصادی و انطباق با چارچوب‌های سخت‌گیرانه نظارتی است.

در نهایت، آینده بسته‌بندی نانومحور مواد غذایی را نمی‌توان صرفاً در افزودن نانوذرات ضدمیکروبی به یک فیلم ساده خلاصه کرد. مسیر آینده به‌سوی بسته‌بندی‌های ادراکی و تصمیم‌گیر حرکت می‌کند که قادرند وضعیت زیستی ماده غذایی را حس کرده، متناسب با تغییرات ریزمحیط واکنش حفاظتی نشان داده و با پردازش داده‌ها، زمان ماندگاری محصول را پیش‌بینی کنند. چارچوب نانوزیست‌فناورانه ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند مبنایی مفهومی و نقشه‌راهی ساختاریافته برای پژوهش‌های آتی و توسعه نسل جدید سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند و فعال در صنایع غذایی باشد.

۱۳. مراجع

1. Brockgreitens, J., & Abbas, A. (2016), “Responsive Food Packaging: Recent Progress and Technological Prospects,” Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15(1), pp. 3–15. DOI: 10.1111/1541-4337.12174.

2. Perera, K.Y., Jaiswal, S. and Jaiswal, A.K. (2022), "A review on nanomaterials and nanohybrids based bio-nanocomposites for food packaging," Food Chemistry, 376, 131912. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131912.
3. Priyadarshi, R., Roy, S., Ghosh, T., Biswas, D. and Rhim, J.W. (2022), "Antimicrobial nanofillers reinforced biopolymer composite films for active food packaging applications: A review," Sustainable Materials and Technologies, 32, e00353. DOI: 10.1016/j.susmat. 2021.e00353.
4. Du, H., Sun, X., Chong, X., Yang, M., Zhu, Z. and Wen, Y. (2023), "A review on smart active packaging systems for food preservation: Applications and future trends," Trends in Food Science & Technology, 141, 104200. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104200.
5. Mishra, B., Panda, J., Mishra, A.K., Nath, P.C., Nayak, P.K., Mahapatra, U., Sharma, M., Chopra, H., Mohanta, Y.K. and Sridhar, K. (2024), "Recent advances in sustainable biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: A review," International Journal of Biological Macromolecules, 279, 135583. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135583.
6. Xu, X., Chen, H., Wang, Q., Su, C., Sun, Y., Qiu, C. and Pang, J. (2025), "Research progress and future trends in smart response packaging for food preservation," Journal of Stored Products Research, 112, 102597. DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102597.
7. Sonika, M., Balakrishnan, M., Ramalakshmi, A., Thirupathi, V. and Rammohan, S. (2026), "Modern Nanobiosensor Approaches for Intelligent Food Packaging: A Review," Journal of Food Process Engineering, 49(6), e70641. DOI: 10.1111/jfpe.70641.
8. Nethra, J., Deepa, S. and Adeyeye, S.A.O. (2026), "Nanotechnology in Food Packaging: Enhancing Safety and Shelf-Life Through Intelligent and Antimicrobial Systems," Journal of Food Process Engineering, 49(7), e70647. DOI: 10.1111/jfpe.70647.
9. Abedi-Firoozjah, R., Ebdali, H., Soltani, M., Abdolahi-Fard, P., Heydari, M., Assadpour, E., Azizi-Lalabadi, M., Zhang, F. and Jafari, S.M. (2024), "Nanomaterial-based sensors for the detection of pathogens and microbial toxins in the food industry; a review on recent progress," Coordination Chemistry Reviews, 500, 215545. DOI: 10.1016/j.ccr.2023.215545.
10. Abedi-Firoozjah, R., Parandi, E., Heydari, M., Kolahdouz-Nasiri, A., Bahraminejad, M., Mohammadi, R., Rouhi, M. and Garavand, F. (2023), "Betalains as promising natural colorants in smart/active food packaging," Food Chemistry, 424, 136408. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136408.
11. Ahmad, A., Qurashi, A., & Sheehan, D. (2023). Nano packaging – Progress and future perspectives for food safety, and sustainability. Food Packaging and Shelf Life, 35, 100997. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100997

12. Fabiyi, O. A., Ogundele, A. V., Akinsipo, O. B., Badeji, A. A., & Silva, H. H. (2026). Smart nano-packaging materials for sustainable food preservation and safety. Discover Food, 6, 209. https://doi.org/10.1007/s44187-026-00906-z
13. Anand, A., Kaur, H., Hansepi, H. and Khaire, K.C. (2026), "Green nanotechnology-enabled biopolymer nanocomposites for eco-innovative and regulatory-compliant antimicrobial food packaging," Frontiers in Industrial Microbiology, 4, 1801909. DOI: 10.3389/finmi.2026.1801909.
14. Dharini, V., Periyar Selvam, S., Jayaramudu, J. and Sadiku, R. (2022), "Functional properties of clay nanofillers used in the biopolymer-based composite films for active food packaging applications: Review," Applied Clay Science, 226, 106555. DOI: 10.1016/j.clay.2022.106555.
15. "Intelligent food packaging: A perception–response–communication–integration roadmap for sustainable sensing and preservation" (2026), Food Control, 187, 112162. DOI: 10.1016/j.foodcont.2026.112162.