



## بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست: اصول و عملکردها در سیستم‌های غذایی پایدار

### حدیث قادری

دانشکده دامپزشکی، دانشگاه بوعلی همدان

### محمد رضا پژوهی الموتی

دانشکده دامپزشکی، دانشگاه بوعلی همدان

### چکیده

صنعت بسته‌بندی تضمین می‌کند که محصولات در شرایط ایمن نگهداری شوند، ضایعات به حداقل برسند و عمر مفید افزایش یابد. بسته‌بندی هوشمند زیستی این قابلیت را دارد که هم به پایداری و هم به نظارت بلادرنگ بر کیفیت مواد غذایی دست یابد، که به مزایای زیست‌محیطی و سلامتی منجر می‌شود. بسته‌بندی هوشمند، که فناوری‌های تعاملی را برای افزایش عمر مفید مواد غذایی فاسدشدنی ادغام می‌کند، موضوع تحقیقات روزافزونی بوده است. بسته‌بندی سنتی به دلیل تجزیه‌پذیری محدود، بالقوه می‌تواند به آلودگی محیط زیست و ایجاد زباله منجر شود. در نتیجه، تقاضا برای جایگزین‌های پایدار در حال افزایش است. این تقاضا تحت تأثیر تغییرات در انتظارات مصرف‌کنندگان، پیچیدگی محصولات و نگرش به سمت پایداری قرار دارد. بنابراین، این مرور اصول کلی، مکانیزم‌ها و چشم‌اندازهای مواد بسته‌بندی هوشمند پایدار، نظیر پلیمرهای چوب‌محور، پروتئین‌محور و میکروبی‌محور را بررسی می‌کند. در این مقاله، اهمیت بسته‌بندی هوشمند زیستی در صنعت غذا با شرح اصول علمی مختلفی که این نشانگرهای نوین بر آن‌ها مبتنی هستند، از جمله نشانگرهای pH و گاز، بیوسنسورها، نشانگرهای دمازمان (TTI) و حسگرهای گاز، با تمرکز بر بهبود کیفیت و ایمنی محصولات غذایی، مورد تأکید قرار گرفته است. در مقایسه با مواد بسته‌بندی سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، بیشتر بسته‌بندی‌های هوشمند زیستی عملکردی مشابه ارائه می‌دهند. این مواد جدید، ایمنی، کارایی و پایداری توزیع و مصرف مواد غذایی بسته‌بندی‌شده را بهبود می‌بخشند. بنابراین، این مرور می‌تواند به عنوان منبعی ارزشمند برای پژوهشگران، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در کاهش اثرات زیست‌محیطی و ترویج شیوه‌های بسته‌بندی پایدار غذایی عمل کند.

**واژگان کلیدی:** بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست، نظارت بر کیفیت غذا، راه‌حل‌های بسته‌بندی پایدار، تکنولوژی‌های بسته‌بندی

هوشمند

## مقدمه

بسته‌بندی غذایی سنتی محصولات را از تخریب ناشی از عوامل محیطی، از جمله گرما، نور، رطوبت، میکروارگانیسم‌ها یا انتشار گازها محافظت می‌کند (He et al, ۲۰۲۳). از منظر تجاری، بسته‌بندی به عنوان نقطه تماس اولیه بین کاربران و محصول عمل می‌کند. بسته‌بندی نوآورانه می‌تواند به عنوان ابزاری برای افزایش فروش، بهبود جذابیت محصول و ارتباط هدف آن با مصرف‌کننده عمل کند (Loučánová et al, ۲۰۲۳). این تنوع به بسته‌بندی محصولات اجازه می‌دهد تا محصولات با اشکال و اندازه‌های مختلف را در خود جای دهد که به طور مؤثری حمل و نقل و نگهداری آن را تسهیل می‌کند. با این حال، بسته‌بندی سنتی با چالش‌هایی مواجه است که ناشی از انتظارات در حال تحول مصرف‌کنندگان، افزایش پیچیدگی محصولات، تغییر نگرش‌ها نسبت به پایداری و ضرورت کاهش ردپای کربن است (Hassan et al, ۲۰۲۲, ۲۰۲۳; Schaefer & Cheung, ۲۰۱۸). برای رسیدگی به این مسائل، حوزه بسته‌بندی هوشمند عملکردی به عنوان یک زمینه تحقیقاتی در حال ظهور شناخته می‌شود (Rehman et al, ۲۰۲۰). اصطلاح بسته‌بندی هوشمند برای توصیف بسته‌بندی محصولاتی که فناوری‌های تعاملی را در خود جای داده‌اند، استفاده می‌شود؛ با این حال، اصطلاح "هوشمند" اغلب به طور متناوب و گاهی نادرست با اصطلاحات "فعال" یا "هوشمند" و بسته‌بندی در ادبیات علمی استفاده می‌شود. بسته‌بندی فعال عمدتاً به اجزایی اشاره دارد که مواد را از محیط حذف یا به آن اضافه می‌کنند تا عمر مفید محصول را افزایش دهند (D. Liu, Zhao, et al, ۲۰۲۲; Menzel et al, ۲۰۲۰). بسته‌بندی هوشمند (IP) برای نظارت بر کیفیت غذاهای بسته‌بندی شده یا محیط آن‌ها به کار می‌رود و اجازه می‌دهد شرایط غذایی بدون تعامل مستقیم با خود محصول ارتباط برقرار شود. بسته‌بندی هوشمند به طور عمده برای محصولات غذایی استفاده شده است تا به کاهش بیشتر ضایعات ناشی از تخریب که می‌تواند در حین حمل و نقل و ذخیره‌سازی رخ دهد، کمک کند، همچنین متغیرهای درونی ناشی از واکنش‌های شیمیایی، فعالیت‌های آنزیمی مختلف و فساد ناشی از میکروب‌ها (Amin et al, ۲۰۲۲). علاوه بر این، در داروها و سایر کالاهای فاسد شنی به دلیل دامنه وسیع کاربردهای آن استفاده می‌شود.

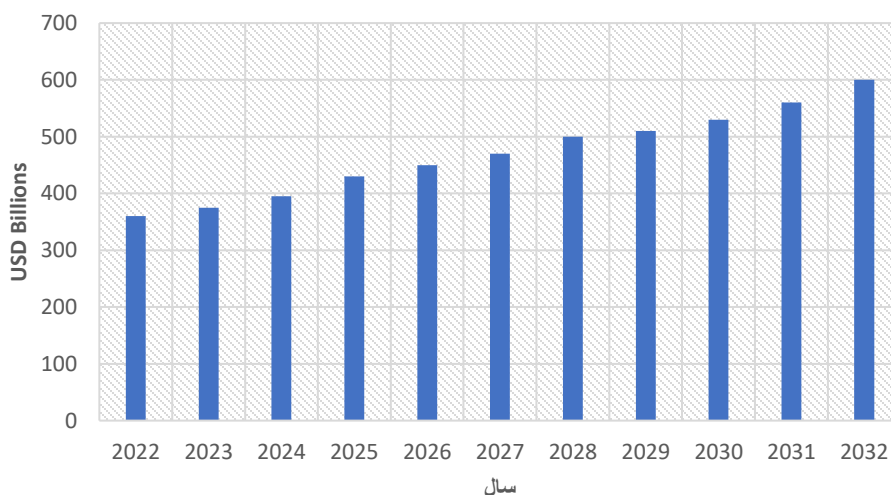
فشار برای جایگزینی پایدار مواد بسته‌بندی سنتی، به ویژه پلاستیک‌ها، نیز شتاب گرفته است (Ranjha et al, ۲۰۲۳; Riaz et al, ۲۰۲۱; Safdar et al, ۲۰۲۱). مواد پلاستیکی به دلیل تنوع، مقرون به صرفه بودن، سبکی و خواص مکانیکی مطلوب خود در بسته‌بندی غالب شده‌اند (Song et al, ۲۰۲۲). با این حال، بیشتر پلاستیک‌های بسته‌بندی مبتنی بر نفت هستند و در برابر تخریب سریع مقاوم‌اند. طبق گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA)، ظروف و بسته‌بندی‌ها به طور قابل توجهی به ترکیب زباله‌های جامد شهری (MSW) کمک می‌کنند و در سال ۲۰۱۸ حدود ۸۲.۲ میلیون تن متریک را تشکیل می‌دهند که ۲۸.۱٪ از کل زباله‌های تولید شده MSW را نمایان می‌کند (US EPA, ۲۰۱۷). علاوه بر این، پاندمی COVID-۱۹ نیز دینامیک‌های بسته‌بندی غذایی را تغییر داده است، زیرا مصرف‌کنندگان بیشتری به خدمات تحویل غذایی بدون آلودگی وابسته‌اند که می‌توانند به طور مؤثری غذاهای طبیعی و با کیفیت بالا را با عمر مفید طولانی توزیع کنند. در نتیجه، چندین بخش بسته‌بندی مرتبط انتظار می‌رود که شاهد رشد باشند. طبق گزارش GlobeNewswire، صنعت بسته‌بندی غذایی جهانی در سال ۲۰۲۲ تقریباً ۳۵۸ میلیارد دلار ارزش داشت و انتظار می‌رود اندازه بازار آن تا سال ۲۰۳۰ به ۵۹۲.۸ میلیارد دلار برسد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است (GlobeNewswire, ۲۰۲۳).

علاوه بر این، ارزش بازار پیش‌بینی‌شده برای بسته‌بندی غذایی هوشمند انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۸ به ۴۸.۹۷ میلیارد دلار برسد. این رشد پیش‌بینی می‌شود که با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) ۴.۴۹٪ در دوره زمانی ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۸ اتفاق بیفتد (Smart

Food Packaging Market Size). با این حال، بیشتر بسته‌بندی‌های پلاستیکی یا به محل‌های دفن زباله منتقل می‌شوند، جایی که ممکن است صدها سال طول بکشد تا تجزیه شوند، یا به اقیانوس‌ها می‌روند، جایی که به میکروپلاستیک‌های مضر تجزیه می‌شوند و وارد زنجیره غذایی دریایی می‌شوند (Lehel & Murphy, ۲۰۲۱, pp. ۱-۴۹). علاوه بر این، پلاستیک‌ها یکی از عوامل مهم در انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی هستند. به همین دلایل، یافتن جایگزین‌های پایدار و کمتر آلوده‌کننده ضروری است.

مواد مبتنی بر زیست به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود مانند تجزیه‌پذیری، غیرسمی بودن و سازگاری با محیط زیست، جایگزین مناسبی برای مواد سنتی ارائه می‌دهند. این مواد توانایی کاهش قابل توجهی در تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با مصرف انرژی و انتشار کربن مربوط به بسته‌بندی‌های سنتی را دارند (Shao et al ۲۰۲۱). این مواد متنوع هستند و رشد قابل توجهی در این حوزه تحقیقاتی مشاهده می‌شود. این شامل پلیمرهای مبتنی بر زیست مشتق شده از چوب (سلولز، همی سلولز، نشاسته و لیگنین)، پروتئین (ژلاتین، کراتین، گلوتن گندم، پروتئین سویا و ایزوله‌های پروتئین وی) و میکروپها (PLA و PHA) می‌باشد که همگی به عنوان جایگزین‌های پایدار برای بسته‌بندی غذایی سنتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Du et al ۲۰۲۳).

تحقیقات در زمینه بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست برای سیستم‌های غذایی در حال افزایش است، با توجه به جستجوی فزاینده برای جایگزین‌هایی برای مواد بسته‌بندی مبتنی بر سوخت فسیلی. در نتیجه، انتظار می‌رود بخش‌های مرتبط با بسته‌بندی استفاده از چنین بسته‌بندی‌هایی را برای کاربردهای غذایی گسترش دهند. بنابراین، این بررسی اصول کلی، مکانیزم‌ها و چشم‌اندازهای مواد بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست، مانند پلیمرهای مبتنی بر چوب، پروتئین و میکروبی را در صنعت غذا شناسایی می‌کند. ادبیات فعلی نشان‌دهنده چشم‌اندازهای عناصر هوشمند و مبتنی بر زیست در بسته‌بندی غذایی است. مطالعات گذشته استفاده از رویکردهای متنوع مبتنی بر زیست و هوشمند در سیستم‌های غذایی و اثربخشی آن‌ها در بخش غذا را برجسته می‌کند (Boukoufi et al ۲۰۲۲). علاوه بر این، تحقیقاتی در حال بررسی پتانسیل و استفاده پیشرفته از نانومواد در چنین نوع بسته‌بندی‌ها وجود دارد (Chausali et al ۲۰۲۲). با این حال، بسیاری از کاربردها و علم زیرین آن‌ها هنوز نیاز به بررسی بیشتری دارند. بنابراین، این شکاف با بحث در مورد چندین مکانیزم و پتانسیل‌های استفاده موجود در حوزه بسته‌بندی هوشمند، از جمله نشانگرهای pH و گاز، جاذب‌های O<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub>، نشانگرهای زمان‌دما (TTI)، حسگرهای گاز، بیوسنسورها و نشانگرهای تازگی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین چندین ماده زیستی عملکردی را با تأکید بر کارایی، مزایا، چالش‌ها و فرصت‌های آن‌ها گزارش می‌دهد.



شکل ۱. رشد مورد انتظار بازار جهانی بسته بندی مواد غذایی از ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۲

## ۲. مفاهیم اصلی بسته بندی هوشمند

### ۲.۱. نشانگرهای pH و گاز، اصول کلی

محصولات غذایی در مراحل مختلفی از ذخیره سازی و حمل و نقل قرار می گیرند و به طور کلی نسبت به سایر کالاهای مصرفی دارای عمر مفید کوتاهی هستند. بنابراین، روش های نظارت بر کیفیت برای تنظیم کیفیت غذا و کاهش ضایعات غذایی ضروری هستند. این سیستم های پیشرفته از نشانگرهای pH و گاز برای ارزیابی تازگی، عمر مفید و احتمال فساد محصولات غذایی بسته بندی شده استفاده می کنند (Y. Ma et al, ۲۰۲۲). هنگامی که غذاها خراب می شوند یا تحت فعالیت میکروبی قرار می گیرند، نشانگرها واکنش های شیمیایی یا آنزیمی را تجربه می کنند که می تواند pH آنها را تغییر دهد یا گازهای خاصی مانند اتیلن، CO<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S را آزاد کند (Karanth et al, ۲۰۲۳). هر دو نوع نشانگر pH و گاز بر اساس یک مکانیزم مشابه عمل می کنند.

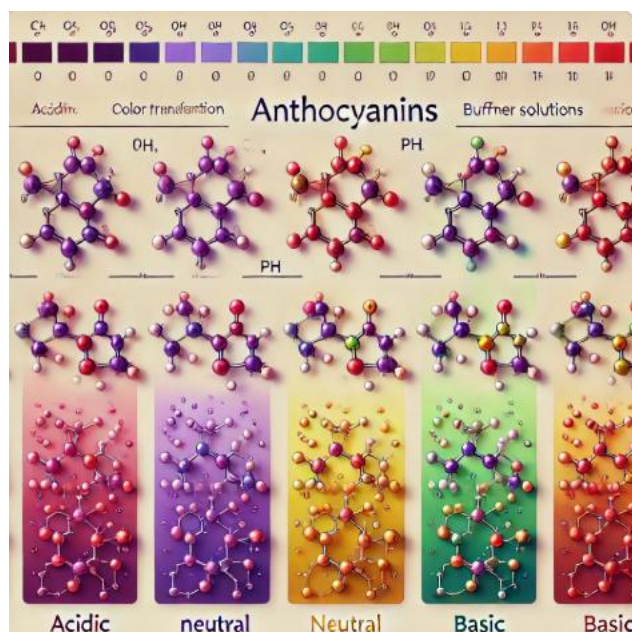
دو روش اصلی برای شناسایی تغییرات pH به طور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته اند: سیستم های الکتروشیمیایی و رنگ سنجی. نشانگرهای pH الکتروشیمیایی از کربن، فلزات، اکسیدهای فلزی و پلیمرها تشکیل شده اند. عملکرد آنها بر اساس اثر لایه دوگانه الکتریکی (EDL) است که رفتار در مرز بین یک جامد و یک مایع را نظارت می کند، به طوری که تغییرات pH خواص الکتریکی ماده را تغییر می دهد (Siddiqui et al, ۲۰۲۲).

از طرف دیگر، نشانگرهای pH رنگ سنجی بر اساس یک ماده پشتیبان و رنگ دانه های حساس به pH عمل می کنند. مکانیزم آنها بر اساس خواص استری مولکول های آلی یا رنگدانه ها است که ویژگی های جذب نوری آنها را با پروتون دار شدن یا دیپروتون دار شدن تغییر می دهد (Siddiqui et al, ۲۰۲۲). وقتی pH درون بسته بندی تغییر می کند، این رنگ ها یا رنگدانه ها دچار تغییر رنگ قابل مشاهده می شوند. با توجه به نگرانی ها در مورد سمی بودن و سرطان زایی برخی رنگ های سنتزی (کلروفنول، قرمز کروسول، قرمز متیل، سبز بروموکروسول و آبی بروموفنول)، رنگدانه های طبیعی مانند آنتوسیانین، کورکومین و کاروتنوئیدها اکنون ترجیح داده می شوند. واکنش رنگدانه های طبیعی به تغییرات pH تحت تأثیر ساختار آنها، دمای خارجی، حضور اکسیژن، آنزیم ها و تابش نور قرار دارد (Roy & Rhim, ۲۰۲۱). به عنوان مثال، آنتوسیانین ها به دلیل قابلیت های وسیع تشخیص pH، غیرسمی بودن، خواص ضدباکتری و فعالیت های آنتی اکسیدانی شان به خصوص محبوب هستند (Oladzadabbasabadi et al, ۲۰۲۲). ساختار و قابلیت های تغییر رنگ آن ها از قرمز در شرایط بسیار اسیدی تا زرد در شرایط قلیایی متغیر است، همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است.

تعداد گروه های هیدروکسیل متصل به مولکول آنتوسیانین بر تغییرات ساختاری آن تأثیر می گذارد و از کاتیون فلاویلیوم (شرایط بسیار اسیدی) به پایگاه کرینول (شرایط اسیدی ملایم) و سپس به پایگاه کینویدال (شرایط خنثی) و در نهایت به کلاکن (شرایط قلیایی) تغییر می کند (Zhao et al, ۲۰۲۲). رنگدانه طبیعی دیگر، کلروفیل، نیز به دلیل تغییرات pH درون یک محصول بسته بندی شده از سبز به قهوه ای/نارنجی تغییر رنگ می دهد (Sigurdson et al, ۲۰۱۷).

رنگدانه های طبیعی همچنین به عنوان نشانگرهای گاز رنگ سنجی برای شناسایی O<sub>2</sub>، CO<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>S، اتیلن و ترکیبات آمونیاک فرار در بسته بندی هوشمند به کار رفته اند (Nabi et al, ۲۰۲۳). مکانیزم عملکرد معمولاً بر اساس تغییر رنگ یک رنگدانه طبیعی در معرض گازهای خاص است. به عنوان مثال، در نشانگرهای گاز رنگ سنجی CO<sub>2</sub>، اسید کربنیک زمانی تولید می شود که CO<sub>2</sub> در

محیط آبی حل شود و یون های  $H_3O^+$  و  $HCO_3^-$  را آزاد کند، که در نتیجه pH را کاهش داده و باعث تغییر رنگ به رنگدانه های اضافه شده می شود (Puligundla et al, ۲۰۱۲). یکی از نمونه ها، بتالین است که در صورت افزایش ترکیبات نیتروژن فرار (گاز آمونیاک) از صورتی به زرد تغییر رنگ می دهد (de Oliveira Filho et al, ۲۰۲۲). کاروتنوئیدها و کورکومین نیز ویژگی های منحصر به فرد تغییر رنگ را به دلیل آزادسازی یا جذب گازهای خاص نشان می دهند. این دو ترکیب به عنوان آنتی اکسیدان های طبیعی عمل می کنند که اکسیداسیون را مهار می کنند و همزمان می توانند تغییر رنگ از زرد به قرمز را به دلیل فرآیند اکسیداسیون نشان دهند که می تواند نشانه ای از تازگی باشد (AlizadehSani et al, ۲۰۲۰; Sani et al, ۲۰۲۱).



شکل ۲. تغییرات رنگ ساختاری و محلولی آنتوسیانین ها در محلول های بافر مختلف (AlizadehSani et al, ۲۰۲۱)

## ۲.۲. نشانگرهای pH

نشانگرهای pH معمولاً از یک زیرلایه پلیمری تشکیل شده اند که با رنگدانه pH سازگار است. سازگاری پایه پلیمری، نوع رنگدانه و روش تهیه همه بر suitability زیرلایه پلیمری تأثیر دارند. پلیمرهای طبیعی شامل نشاسته ها، کیتوزان، سلولز و ژلاتین به دلیل مزایای زیست محیطی و سازگاری زیستی شان به طور فزاینده ای مورد توجه قرار گرفته اند (Florez et al, ۲۰۲۲). برای عملکرد بهینه، زیرلایه ها و نشانگرهای استفاده شده باید در pH پایین پایدار، تقریباً بی رنگ، حساس به رطوبت و دارای خواص مکانیکی مناسب باشند (Almasi et al, ۲۰۲۲; D. Liu, Zhang, et al, ۲۰۲۲). این مطالعات نشان می دهند که معمولاً نشانگرهای موجود که به این روش تهیه شده اند، تنها در تشخیص اینکه آیا غذا تازه است یا فاسد، خوب عمل می کنند و هیچ تفاوتی قائل نمی شوند. بنابراین، چندین روش تولید در حال توسعه است تا سطوح مختلف فساد را متمایز کند. با این حال، در مقایسه با ابزارهای تحلیلی مانند طیف سنجی رزونانس مغناطیسی هسته ای (NMR) و روش های مختلف کروماتوگرافی، این مواد بسته بندی هوشمند با نشانگرهای pH و گاز می توانند اطلاعات را به سرعت و به صورت مقرون به صرفه ارائه دهند.

## ۲.۲. حسگرهای زیستی

حسگرهای زیستی دستگاه‌های تخصصی هستند که از اجزای بیولوژیکی برای شناسایی و تحلیل تغییرات در مواد استفاده می‌کنند و راه‌حل‌های امیدوارکننده‌ای برای کاهش ضایعات غذایی و نگرانی‌های ایمنی ارائه می‌دهند. در جستجوی جایگزین‌های دوستدار محیط‌زیست و پایدار برای مواد مبتنی بر نفت، حسگرهای زیستی که دوستدار محیط‌زیست، قابل تجزیه و سازگار با بیولوژی هستند، به‌عنوان گزینه‌ای قابل قبول ظهور یافته‌اند. تحقیقات قابل توجهی در مورد انواع مختلف حسگرهای زیستی، شامل حسگرهای نوری، الکتروشیمیایی، آکوستیک و گاز انجام شده است (Rodrigues et al, ۲۰۲۱).

حسگرهای نوری مبتنی بر اصول جذب، فلورسانس یا رزونانس پلاسما سطحی، انتخاب‌پذیری، حساسیت و سرعت قابل توجهی را نشان می‌دهند. آن‌ها کاربردهایی در شناسایی رطوبت، مقادیر pH و گونه‌های آلی یافته‌اند. به‌عنوان مثال، چن و همکاران (۲۰۱۲) یک حسگر الیاف حساس به رطوبت مبتنی بر تداخل‌سنجی فابریپروت توسعه دادند که با یک لایه نازک کیتوزان پوشش داده شده است و پاسخ آن به تورم کیتوزان به‌دلیل تغییرات رطوبت نسبی بستگی دارد و منجر به تغییر مسیر نوری می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، کسووندی و همکاران (۲۰۲۰) حسگر pH خوراکی را با ثابت کردن آنتوسیانین‌ها از کلم قرمز روی غشای سلولز باکتریایی گزارش کردند. این حسگر دامنه‌ای از رنگ‌ها، از قرمز تا بنفش، آبی تا خاکستری و زرد را نمایش می‌دهد و به‌طور مؤثری طیف pH از ۱ تا ۱۴ را پوشش می‌دهد و می‌تواند بین شیر تازه و فاسد تمایز قائل شود. کالیر و مک‌شین (۲۰۱۳) یک حسگر نوری گلوکز آنزیمی معرفی کردند که به تغییرات غلظت اکسیژن محیطی (۱۰۰-۲۵۰ میکرومول) حساس است. چنین حسگرهای نوری گلوکز پتانسیل ارائه یک روش غیرتهاجمی و بدون درد برای نظارت بر سطح گلوکز در بیماران دیابتی را دارند. استفاده از فسفرهای حساس به اکسیژن با گلوکز اکسیداز امکان ارزیابی غیرمستقیم سطح گلوکز را از طریق نظارت بر مصرف اکسیژن فراهم می‌کند که می‌تواند به‌طور بالقوه برای درمان دیابت استفاده شود.

حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی از سیگنال الکتروشیمیایی برای شناسایی و اندازه‌گیری یک آنالیت استفاده می‌کنند. آن‌ها شامل یک عنصر شناسایی بیولوژیکی و یک مبدل الکتروشیمیایی هستند. معمولاً، یک آنزیم یا آنتی‌بادی روی سطح الکتروود برای شناسایی بیولوژیکی ثابت می‌شود، در حالی که مبدل الکتروشیمیایی سیگنال بیوشیمیایی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. روش‌های مختلفی برای ثابت‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است، از جمله پیوند کوالانسی، جذب سطحی، متصل کردن به نانوذرات، محصورسازی و حبس آنزیم (Sobhan et al, ۲۰۲۱). این حسگرها دارای انتخاب‌پذیری بالا و به‌طور خاص هدف‌گذاری زیرلایه‌های مورد نظر هستند. به‌عنوان مثال، سانی و همکاران یک حسگر زیستی مبتنی بر DNA برای شناسایی مواد سرطان‌زا در غذا گزارش کردند که شامل ثابت‌سازی DNA تکرار شده‌ای با انتهای آمین روی نانوکره‌های سیلیکایی و قرار دادن آن‌ها روی الکترودهای چاپ‌شده با نانوذرات طلا است (Md. Sani et al, ۲۰۱۹).

حسگرهای آکوستیک شامل یک مبدل هستند که انرژی آکوستیک را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. یک لایه از مولکول‌های بیولوژیکی که قادر به شناسایی مولکول هدف مورد نظر هستند، روی مبدل پوشش داده می‌شود. هنگامی که مولکول هدف به مولکول‌های بیولوژیکی روی مبدل متصل می‌شود، تغییراتی در خواص آکوستیک مبدل ایجاد می‌کند. سپس یک مدار الکترونیکی این تغییر را شناسایی می‌کند و امکان اندازه‌گیری کمی مولکول هدف را فراهم می‌آورد (Koehler, ۲۰۱۴).

حسگرهای گاز طراحی پیچیده‌ای دارند و شامل سه الکتروود حیاتی هستند: الکتروود حسگر، الکتروود متعادل و الکتروود مرجع. این الکتروودها به‌طور مشترک برای تسهیل شناسایی گاز عمل می‌کنند. الکتروود حسگر به‌عنوان الکتروود کاری عمل می‌کند، جایی که واکنش اصلی با گاز هدف انجام می‌شود. الکتروود متعادل واکنش‌های occurring در الکتروود حسگر را متعادل می‌کند. در نهایت،



الکتروُد مرجع پتانسیل را اندازه گیری کرده و پتانسیل ثابت را برای الکتروُد کاری حفظ می کند و از این طریق قابلیت اطمینان و دقت حسگر را تضمین می کند. مرحله اولیه در شناسایی گاز شامل نفوذ گاز از طریق یک مانع هیدروفوبیک، معمولاً تفلون، تا رسیدن به الکتروُد کاری است. الکتروُد کاری شامل یک جزء حسگر گاز است که به گاز هدف خاص واکنش نشان می دهد و به این ترتیب یک سیگنال الکتروشیمیایی تولید می کند (Sobhan et al, ۲۰۲۱). به عنوان مثال، سونک و همکاران (۲۰۲۲) موفق به فرمول بندی ماده ای متشکل از پلی (لاکتیک اسید) (PLA) و پلی (کربنات پروپیلن) (PPC) همراه با کورکومین (CCM) به عنوان عامل حسگری برای شناسایی بخار آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) و نظارت بر فساد غذا شدند. (Panwar et al, ۲۰۲۲) ایجاد یک برچسب نشان دهنده اکسیژن مبتنی بر کپاکاراژینان، فعال شده توسط نور ماوراء بنفش، و ساخته شده با استفاده از روش الکترواسپینینگ را توصیف کردند. کپاکاراژینان با اجزایی مانند رنگ دانه ردوکس، اهداکننده الکترون قربانی، فتوکاتالیست و حلال ترکیب شده بود. این برچسب حاصل، پایداری قابل توجهی را نشان داد و پتانسیل استفاده در ارزیابی یکپارچگی بسته ها در بسته بندی با جو اصلاح شده، به ویژه در شرایط بدون اکسیژن، را دارد.

### ۲.۳. حسگرهای گاز

حسگرهای گاز نوع دیگری از حسگرهای شیمیایی هستند که شامل یک مبدل (تبدیل سیگنال) و یک لایه فعال (ماده حساس به گاز) می باشند. این حسگرها اطلاعات شیمیایی را به سیگنال های الکتریکی تبدیل می کنند که معمولاً از طریق تغییرات در فرکانس، جریان و/یا ولتاژ انجام می شود. برای عملکرد بهینه، حسگرهای گاز باید حساسیت، انتخاب پذیری، استحکام، قابلیت اطمینان، بازگشت پذیری، حد تشخیص پایین، زمان پاسخ سریع، مصرف کم انرژی، حداقل حساسیت متقاطع و هزینه کم را نشان دهند. عملکرد حسگرهای گاز مبتنی بر زیست محیطی بر اساس همان اصول حسگرهای بسته بندی هوشمند متعارف است که از اصول علمی مشابهی استفاده می کنند. برخی از این اصول شامل واکنش های شیمیایی، جذب، خواص الکتریکی، خواص نوری، واکنش های آنزیمی، حسگرهای زیستی و پلیمرهای رسانا هستند (Hübert et al, ۲۰۱۱). گاز خاصی که باید شناسایی شود و سطح حساسیت مورد نیاز برای کاربرد، نوع حسگری که باید استفاده شود را تعیین می کند. حسگرهای بسته بندی هوشمند مبتنی بر زیست محیطی ویژگی های متمایزی دارند به دلیل استفاده از مواد مشتق شده از منابع تجدیدپذیر شامل گیاهان، قارچ ها و باکتری ها. این مواد می توانند با گازهای خاص در یک بسته تعامل داشته باشند و یک روش طبیعی و پایدار برای نظارت بر تغییرات در محیط بسته و واکنش به موقع ارائه دهند.

مواد حساس به گاز بالقوه برای استفاده در حسگرهای گاز، اکسیدهای فلزی نیمه رسانا هستند. با این حال، یک اشکال این است که چیپ حسگر گاز اکسید فلزی باید در دماهای بالا، از ۱۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد کار کند (Woo et al, ۲۰۱۶). توسعه حسگرهای مقرون به صرفه و قابل اعتماد، به ویژه آن هایی که می توانند در دمای محیط کار کنند، همچنان یک چالش علمی و فناوری است. مکانیزم های دقیق زیرین مسئول پاسخ های گازی هنوز در حال بحث است. با این حال، هنگامی که مولکول های گاز با سطح نیمه رسانا (مانند اکسید فلزی، نانو لوله های کربنی، پلیمرهای رسانا و مواد ۲ بعدی) تعامل می کنند، سطوح انرژی نوارهای الکترونیکی ماده را از طریق فرآیندی به نام انحنا نوار تغییر می دهند و در نتیجه بر هدایت الکتریکی ماده تأثیر می گذارند. علاوه بر این، برخی از تعاملات منجر به تغییرات در سایر پارامترهای فیزیکی (مانند نفوذپذیری، کارکرد) می شوند و توسط مبدل به پارامترهای الکتریکی (مانند مقاومت، ظرفیت و القا) تبدیل می شوند و سیگنال حسگری (مانند ولتاژ یا جریان) تولید می کنند که اندازه، فرکانس و فاز آن قابل نظارت است.

برای مولکول‌های گاز باردار که با اکسید فلزی نیمه‌رسانا حساس به گاز تعامل می‌کنند، وجود بار منفی در گونه‌های اکسیژن منجر به اثر انحنای نوار به سمت بالا می‌شود. در نتیجه، هدایت الکتریکی ماده نسبت به حالت پایه خود کاهش می‌یابد که معمولاً به‌عنوان حالت "نوار صاف" شناخته می‌شود (Wang et al, ۲۰۱۰). شایان ذکر است که مولکول‌های گاز خاص مسئول این اثرات ممکن است متفاوت باشند، بسته به نوع گازی که شناسایی می‌شود و خواص ذاتی مواد نیمه‌رسانا.

همین اصل در بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست‌محیطی زمانی که پلیمرهای رسانا برای شناسایی گازهایی مانند  $CO_2$ ،  $O_2$  و مواد فرار استفاده می‌شوند، اعمال می‌شود. ویژگی‌های الکتریکی پلیمرهای رسانا زمانی که گاز با آن‌ها واکنش می‌دهد، تغییر می‌کند و این تغییرات می‌توانند ثبت شوند و به‌این ترتیب برای پیگیری محیط درون بسته استفاده شوند. علاوه بر این، رابط‌ها در حسگرهای شیمیایی الکتریکی نقش کلیدی در تعیین حساسیت، پایداری و سازگاری زیستی دستگاه‌های حسگر ایفا می‌کنند، زیرا آن‌ها مکان‌هایی هستند که مولکول‌های گاز به‌طور مستقیم با ماده حسگر تعامل دارند (Z. Liu et al, ۲۰۲۳). ماده حسگر باید به‌گونه‌ای طراحی شود که سطحی بزرگ و نمایان برای تعامل با مولکول‌های گاز داشته باشد، تعداد زیادی سایت فعال برای اتصال به این مولکول‌ها داشته باشد و توانایی تبدیل مؤثر این وقایع اتصال مولکولی به سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری را داشته باشد.

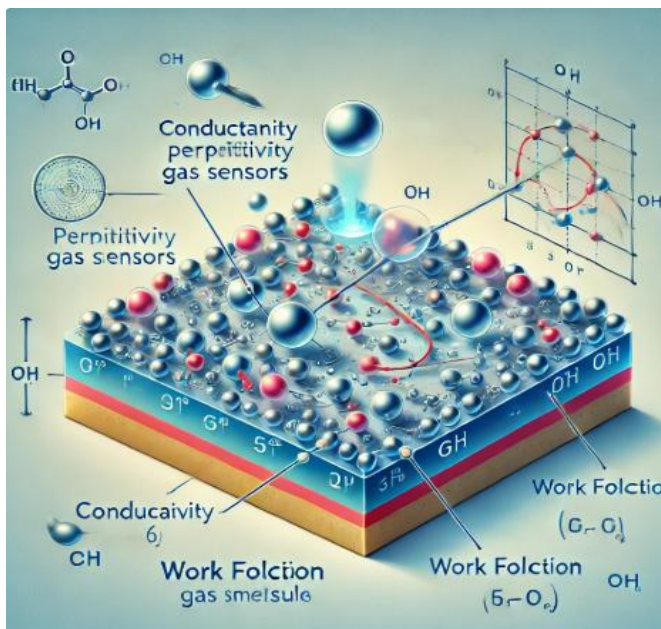
#### ۲.۴. نشانگرهای زماندما (TTI)

شکل (۳) یک روش شناسایی از مواد نیمه‌رسانا با مولکول‌های گاز (حسگری) را نشان می‌دهد که در آن تعامل مواد با مولکول‌های گاز باعث تغییراتی در پارامترهای فیزیکی مانند هدایت، نفوذپذیری و کارکرد می‌شود. مبدل در حسگرهای گاز ویژگی‌های فیزیکی را به سیگنال‌های الکتریکی مانند مقاومت، ظرفیت و القا تبدیل می‌کند و بدین ترتیب بر حساسیت، پایداری و سازگاری زیستی تأثیر می‌گذارد. تغییرات نسبتاً بزرگ در هدایت به‌دلیل تغییرات فیزیکی و/یا شیمیایی محصول، دامنه دینامیک حسگری مطلوبی را ارائه می‌دهد (Nikolic et al, ۲۰۲۰).

آنزیم‌ها همچنین می‌توانند به‌عنوان گیرنده‌ها در مواد بسته‌بندی گنجانده شوند و به‌عنوان حسگرهای زیستی برای شناسایی گازهایی مانند اکسیژن و دی‌اکسید کربن عمل کنند. این کاتالیزورهای بیولوژیکی پاسخ‌های خاص و انتخابی به فرآیندهای شیمیایی مختلف ارائه می‌دهند (Park et al, ۲۰۱۵). به‌عنوان مثال، گازهای مختلف در تعامل با آنزیم‌های خاص، واکنشی ایجاد می‌کنند که می‌تواند یک پاسخ را تحریک کند و سپس برای بررسی یکپارچگی و ایمنی کلی محتویات درون بسته مورد استفاده قرار گیرد. کورتاکه و همکاران (۲۰۱۷) یک حسگر بیولوژیکی گاز الکتروشیمیایی طراحی کردند که برای شناسایی بخار اتانول طراحی شده بود. این حسگر از آنزیم‌هایی استفاده می‌کرد که بر روی کاغذ کروماتوگرافی قرار داده شده بودند و به‌عنوان یک لایه حمایت‌کننده آنزیمی عمل می‌کردند. این لایه با یک لایه فازی مایع که بر روی الکترودهای کربنی چاپ‌شده قرار داشت، همراه بود. کاغذ کروماتوگرافی، یک ماده متخلخل ساخته شده از الیاف سلولزی است که به‌عنوان الکتروود آنزیمی مناسب برای شناسایی گاز عمل می‌کند. این کار با غوطه‌ور کردن کاغذ در یک محلول آنزیمی و سپس خشک کردن آن انجام می‌شود. با توجه به خواص جذب بالای آب کاغذ کروماتوگرافی (ChrPrs)، شرایط مرطوب و تغییرات با غوطه‌ور کردن ChrPrs در محلول بافر فسفات، اکسیداز الکل و پراکسیداز به‌عنوان لایه آنزیمی و  $[Fe(CN)_6]^{4-} K^+$  به‌عنوان لایه میانجی ایجاد شد. مکانیزم بنیادی شامل آغاز اکسیداز الکل در تبدیل اتانول به استالدهید با استفاده از اکسیژن ( $O_2$ ) به‌عنوان پذیرنده الکترون است و در نتیجه پراکسید هیدروژن به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌شود. سپس پراکسیداز برای کاهش پراکسید هیدروژن به آب ( $H_2O$ ) وارد عمل می‌شود و Ferro به‌عنوان اهداکننده



الکترون عمل کرده و منجر به تولید  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$  می شود. اندازه گیری جریان کاهش Ferro در الکتروکد کار پس از این فرآیند انجام می شود. به این ترتیب، جریان کاهش Ferro در الکتروکد کار ارزیابی می شود. در نتیجه، یک نسبت مستقیم بین جریان کاهش Ferro و غلظت اتانول وجود دارد. همان طور که نویسندگان اشاره کرده اند، غلظت بخار اتانول ۷۸ ppm شناسایی شد، که نشان دهنده مصرف الکل است. به ویژه، الکترودهای کاغذی کروماتوگرافی مبتنی بر آنزیم جدید (ChrSPCEs) می توانند بخار اتانول را در محدوده ۵۰-۵۰۰ ppm شناسایی کنند. علاوه بر این، مطالعه تأکید کرد که ChrSPCEs می توانند به عنوان حسگرهای بخار برای بیماری های مختلف با سفارشی سازی آنزیم ثابت شده در ChrPr تطبیق داده شوند.



شکل ۳. روش تشخیص برای مواد حسگر گاز نیمه هادی (Nikolic et al, ۲۰۲۰)

#### ۲.۴. نشانگرهای زماندما (TTI)

نشانگر زماندما (TTI) یک دستگاه مقرون به صرفه و ساده است که به کانتینرهای حمل و نقل یا بسته های مصرف کننده متصل می شود. این دستگاه تغییرات قابل اندازه گیری را که به زمان و دما وابسته است، نشان می دهد و تاریخچه حرارتی مواد خوراکی و تغییرات غیرقابل برگشت احتمالی آن ها را نمایان می سازد (Wang et al, ۲۰۱۰). برخی از TTI های جدید معرفی شده در بازار شامل WarmMark، VarioSens، Timestrip®، FreshCheck®، CheckPoint، M™ MonitorMark™، TimeTemp Tags هستند (Kerry et al, ۲۰۰۶).

به عنوان مثال، M™ MonitorMark™ که توسط شرکت M۳ مستقر در سنت پال، مینه سوتا، ایالات متحده توسعه یافته است، یک نشانگر غیرقابل برگشت است که بر اساس نفوذ یک استر اسید چرب رنگی از طریق یک فتیله متخلخل عمل می کند. پاسخ قابل اندازه گیری فاصله بین مبدا و جلوی نفوذ پیشرفت کننده است. نرخ واکنش و تغییرات وابسته به دما توسط پیکربندی برچسب، غلظت نفوذی پلیمر و دمای انتقال شیشه ای آن تنظیم می شود (Pavelková & Flimelová, ۲۰۱۲).

نشانگر TTI CheckPoint® (VITSAB A. B, مالمو، سوئد) به کاهش pH ناشی از هیدرولیز یک زیرلایه لیپیدی که مسئول تغییر رنگ مربوطه است، وابسته است. این یک سیستم آنزیمی با یک برچسب چسبناک ساده است که به تغییرات زمان و دما به طرز مشابه با آنچه که غذا تجربه کرده است، پاسخ می‌دهد و پیامی مرتبط با تازگی غذا ارائه می‌دهد. در واقع، این نشانگر اطلاعات حیاتی مربوط به زمان نگهداری محصول در انبار را به مصرف‌کننده منتقل می‌کند (Pavelková & Flimelová, ۲۰۱۲).

به‌طور مشابه، Timestrips® (Timestrip UK Limited, انگلستان) برچسب‌های نوآورانه‌ای هستند که به‌طور مداوم زمان سپری‌شده را زیر نظر دارند و می‌توانند هر چیزی را از ۱۰ دقیقه تا یک سال پیگیری کنند. هنگامی که مصرف‌کننده بسته محصول را باز می‌کند، برچسب فعال می‌شود. به این ترتیب، مصرف‌کننده به‌طور مداوم از زمان سپری‌شده از زمان باز شدن نخستین بسته مطلع است (Kuswandi et al, ۲۰۱۱). نشانگر FreshCheck® (Temptime Corp, موریس پلینز، نیوجرسی، ایالات متحده) یک پلیمر با رنگدانه بالا تولید می‌کند که از طریق یک واکنش پلیمریزاسیون در حالت جامد به دست می‌آید. یک دیسک کوچک ساخته شده از پلیمر با یک حلقه چاپی مرجع در اطراف آن برای نشان‌دهی استفاده می‌شود. اگر بسته تحت دماهای نامطلوب قرار گیرد، دایره داخلی پلیمر تیره می‌شود و این تغییر رنگ می‌تواند اندازه‌گیری و با مقیاس رنگ مرجع برچسب مقایسه شود. نشانگر TTI Sensor™ (Avery Dennison Corp, ایالات متحده) از اصل واکنش نفوذ استفاده می‌کند. به‌طور خاص، نفوذ یک مؤلفه قطبی بین دو لایه پلیمر منجر به تغییرات رنگ یک نشانگر فلورسانت از زرد به صورتی روشن نسبت به تغییرات غلظت می‌شود. در حال حاضر، رنگ‌های طبیعی به‌عنوان انتخابی محبوب برای برچسب‌گذاری TTI ها به‌منظور برآورده کردن نیازهای مصرف‌کنندگانی که به دنبال محصولات غذایی ایمن و قابل اعتماد هستند، مطرح شده‌اند. راجملیا و همکاران (۲۰۱۸) یک برچسب TTI با استفاده از رنگ‌های طبیعی به‌دست‌آمده از عصاره ذرت سیاه و کیتوزان به‌عنوان ماتریس ایجاد کردند. آن‌ها مشاهده کردند که برچسب در طول زمان دچار تغییر رنگ می‌شود و از بنفش به آبی و سپس به زرد تغییر می‌کند. تغییر رنگ برچسب‌ها در دماهای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در طول یک دوره نظارت شد. تغییرات رنگ در دمای بالاتر ۴۰ درجه سانتی‌گراد سریع‌تر و در دمای پایین‌تر ۱۰ درجه سانتی‌گراد کندتر بود (Rachmelia & Imawan, ۲۰۱۸). پیشنهاد شده است که نوسانات دما در محصولات غذایی می‌تواند از طریق افزودن آنتوسیانین‌ها به بسته‌بندی بیوپلیمر نظارت شود، زیرا آنتوسیانین‌ها با افزایش دما دچار تغییرات ساختاری می‌شوند (Azman et al, ۲۰۲۲). درمان‌های TTI که مبتنی بر آنزیم‌ها و میکروب‌ها هستند، به مواد نزدیک هستند که باعث فساد غذا در حین نگهداری می‌شوند. با تغییر رنگ به دلیل کاهش pH ناشی از اسید لاکتیک تولید شده توسط باکتری‌های مرتبط، TTI میکروبی نشان می‌دهد که کیفیت غذا کاهش یافته است (Ellouze & Augustin, ۲۰۱۰).

TTI ها در پیش‌بینی ویژگی‌های غذایی که به آن‌ها خدمت می‌کنند، قابل اعتماد هستند. با این حال، پیش‌بینی TTI گاهی اوقات می‌تواند ضعیف باشد. عدم دقت پیش‌بینی TTI ممکن است به بی‌ثباتی مواد شیمیایی منبع TTI و حساسیت دما متغیر بین TTI و غذا نسبت داده شود. ایجاد همبستگی بین سطوح کیفیت غذا و توالی تغییرات رنگ TTI از طریق اجرای یک آزمایش ذخیره‌سازی حاصل می‌شود. هدف از این فرآیند ایجاد یک منحنی کالیبراسیون است که مقادیر TTI را به نمونه‌های غذایی مربوطه مرتبط کند. اگر در وابستگی دما بین TTI و غذا اختلافی وجود داشته باشد، منحنی کالیبراسیون حاصل با منحنی به‌دست‌آمده در دماهای مختلف متفاوت خواهد بود. در این سناریو خاص، ایجاد یک کالیبراسیون نماینده انتظار می‌رود که چالش‌هایی را به همراه داشته باشد. کیم و همکاران (۲۰۱۳) روشی برای کالیبره کردن TTI میکروبی با استفاده از یک باکتری اسید لاکتیک ارائه دادند که با بررسی پاسخ TTI میکروبی (تغییر رنگ، اسیدیته قابل تیتر) و کیفیت‌های گوشت خوک چرخ‌کرده در دماهای مختلف ذخیره‌سازی انجام شد. نتایج نشان داد که اگر وابستگی دما بین پاسخ TTI و ویژگی‌های غذایی شباهت قابل توجهی را نشان دهد، منحنی‌های

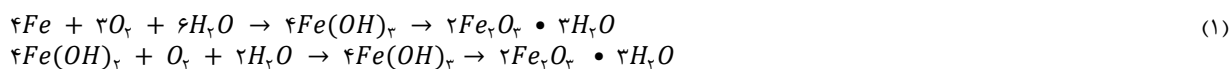
رابطه برای دماهای مختلف با هم ادغام می شوند و یک منحنی کالبراسیون عملی واحد تشکیل می دهند. برای اینکه TTI به عنوان یک نشانگر معتبر محسوب شود، ضروری است که یک منحنی واحد وجود داشته باشد که پاسخ TTI را به ویژگی های غذایی نشان دهد، صرف نظر از تاریخچه های مختلف زماندا.

## ۲.۵. بسته بندی اکسیژن (ROP)

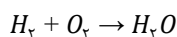
بسته بندی اکسیژن (ROP) عمدتاً به چگونگی نگهداری آن در دمای مناسب در طول فرآیندهای توزیع و ذخیره سازی بستگی دارد. توسعه نوع E باکتری کلستریدیوم بوتولینوم نگرانی هایی را برای اداره غذا و داروی ایالات متحده (FDA) ایجاد می کند، زیرا می تواند باعث سمی شدن محصولات دریایی بسته بندی شده با ROP قبل از فاسد شدن آنها شود. FDA توصیه کرده است که از نشانگرهای زماندا (TTI) برای پیگیری و کنترل ایمنی محصول استفاده شود، به دلیل احتمال تولید سم در شرایطی که در طول توزیع رخ می دهد. (Skinner & Larkin, ۱۹۹۸) به رابطه زمان تأخیر سم بوتولینوم اشاره کردند تا عملکرد برخی از TTI های رایج (Vitsab M<sup>۲۱۰</sup>, C<sup>۲۱۰</sup> و FreshCheck TJ<sup>۲</sup>) و پنج (Avery Dennison) TTI prototype را ارزیابی کنند. (ENDOZA et al, ۲۰۰۶) یافته های خود را با استفاده از پارامترهای کینتیکی و مدل سازی کامپیوتری برای گمانه زنی و ارزیابی عملکرد واقعی TTI تحت شرایط حرارتی مختلف گزارش کردند. دوره های تأخیر سم پیش بینی شده برای آزمایش های حرارتی به خوبی با نقاط انتهایی پاسخ واقعی TTI برای Vistab M<sup>۲۱۰</sup>, Avery Dennison T<sup>۱۲۶</sup> (۲) و T<sup>۱۲۶</sup> (۴) مطابقت داشت و نشان داد که این TTI ها برای شناسایی ایمنی غذاهای دریایی مفید خواهند بود.

## ۲.۶. جاذب های اکسیژن

اکسیژن می تواند در یک طیف وسیع از محصولات باعث تخریب شود، از کاهش کیفیت نهایی محصول گرفته تا فساد کامل که ممکن است برای مصرف کنندگان خطرناک باشد (Sahraee et al, ۲۰۱۹). برای حل این مشکل، راه حل های بسته بندی پیشرفته از جاذب های اکسیژن استفاده می کنند. این فناوری های نوآورانه از موادی استفاده می کنند که در واکنش های شیمیایی با اکسیژن شرکت می کنند و به طور مؤثر آنها را از محیط بسته بندی حذف می کنند (Apicella & Incarnato, ۲۰۱۹). چندین نوع جاذب اکسیژن با توجه به عامل شیمیایی مورد استفاده برای جذب اکسیژن از یکدیگر متمایز می شوند. یکی از این دسته ها، جاذب های اکسیژن مبتنی بر آهن هستند که از واکنش های اکسید و احیا برای جداسازی اکسیژن استفاده می کنند (Polyakov & Miltz, ۲۰۱۰):



جاذب های اکسیژن مبتنی بر آهن به وجود آب برای عملکرد خود وابسته هستند که می تواند از رطوبت جوی تأمین شود یا با معرفی مستقیم آب به ماده جاذب تأمین گردد. از آنجا که در شرایط خشک، آهن یک لایه غیرفعال در اطراف خود تشکیل می دهد، آب حفره هایی در این لایه ایجاد می کند که اجازه می دهد اکسیژن بیشتری با آن تعامل کند (Foltynowicz et al, ۲۰۱۷). برای افزایش ظرفیت جذب اکسیژن آهن، می توان از کاتالیزورهایی مانند NaCl استفاده کرد. استراتژی های جایگزین مانند افزایش سطح ذرات آهن از طریق کاهش اندازه ذرات یا پوشش پلیمری نیز برای بهبود کارایی جذب استفاده می شود (WłosiakHnat et al, ۲۰۱۹). نوع دیگری از جاذب اکسیژن، پالادیوم است که با کاتالیز کردن اکسیداسیون هیدروژن که به اکسیژن برای تشکیل آب نیاز دارد، عمل می کند:



(۲)

از آنجا که پالادیوم در واکنش قبلی مصرف نمی‌شود، می‌تواند به‌عنوان یک جاذب مؤثر در غلظت‌های پایین عمل کند و از هیدروژن موجود در هوا داخل بسته‌بندی بهره‌برداری کند (Hutter et al, ۲۰۱۶). هیدروکربن‌های غیر اشباع نقش دوگانه‌ای در تنظیم سطح اکسیژن درون بسته ایفا می‌کنند، هم به‌عنوان یک مانع فیزیکی و هم به‌عنوان یک ماتریس حمایتی برای تشکیل فیلم‌های جاذب اکسیژن. بلورینگی هیدروکربن‌های غیر اشباع به‌طور قابل توجهی بر نفوذپذیری گاز تأثیر می‌گذارد و تغییر آن می‌تواند کارایی آن‌ها را افزایش دهد (Quan et al, ۲۰۲۳). لایه‌های نمک‌های کبالت می‌توانند عبور اکسیژن از طریق بسته‌بندی را مسدود کنند. این نمک‌ها همچنین به‌طور شیمیایی با اکسیژن تعامل کرده و بنابراین آن را از طریق فرآیند تکثیر اکسیژن جذب می‌کنند (Pourshahbazi et al, ۲۰۲۲). علاوه بر این، ترکیبات حاوی کبالت مانند اسیدهای آمینه دارای قابلیت‌های جذب اکسیژن نیز هستند (Damaj et al, ۲۰۰۹). جاذب‌های اکسیژن غیر فلزی مانند آلفاتوکوفرول در حضور گونه‌های اکسیژن واکنشی یا از طریق اکسیژن سینگلت اکسید می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است (Kruk et al, ۲۰۰۵).

### ۳. کاربردهای بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر بیو

#### ۳.۱. محصولات لبنی

محصولات لبنی به‌دلیل اینکه شیر مواد مغذی فراوانی را برای رشد میکروبی فراهم می‌کند، بسیار مستعد فساد هستند (Karaman et al, ۲۰۱۵). حفاظت مؤثر از محصولات لبنی از طریق بسته‌بندی هوشمند ممکن است در حالی که بینش‌های ارزشمندی را در مورد تاریخچه محصول به کاربران ارائه می‌دهد، فراهم شود. در طول ذخیره‌سازی، pH شیر به‌دلیل اسیدی شدن و تخریب ناشی از تولید اسید لاکتیک توسط میکروب‌ها کاهش می‌یابد. pH شیر تازه‌دوشیده‌شده گاو به‌طور ملایم اسیدی است و در محدوده ۶.۴ تا ۶.۸ قرار دارد. هنگامی که شیر تجزیه می‌شود، pH محیط اطراف خود را تغییر می‌دهد و آن را کمتر پایدار می‌کند (Ebrahimi Tirtashi et al, ۲۰۱۹). ما و وانگ (۲۰۱۷) یک فیلم حسگر pH رنگ‌سنجی توسعه دادند که با وارد کردن عصاره پوست انگور به ماتریس بسته‌بندی گام/نانوکریستال سلولز ساخته شده است. نویسندگان دریافتند که هنگامی که pH شیر از ۱ به ۱۱ تغییر می‌کند، رنگ بسته‌بندی تغییر می‌کند.

صنعت بسته‌بندی تمایل دارد به جای رنگ‌های سنتزی از آنتوسیانین‌ها استفاده کند، به‌دلیل ویژگی‌های مطلوب متعدد آن‌ها از جمله سازگاری زیستی، ظرفیت بازسازی، عدم سمیت و سادگی در کاربرد. بسیاری از پژوهشگران تحقیقات خود را برای تولید فیلم‌های مبتنی بر زیست‌مواد به‌منظور ترویج و پیشرفت حوزه بسته‌بندی هوشمند انجام داده‌اند، با این فرض که آنتوسیانین‌ها به‌عنوان تابعی از pH تغییر رنگ می‌دهند. باندی‌وپادیا و همکاران (۲۰۲۰) فیلمی از CMC/polyvinyl pyrrolidone/گوارگام/سلولز باکتریایی حاوی آنتوسیانین کلم (قرمز) ایجاد کردند تا فساد پنیر گودا را در برچسب‌های بسته‌بندی تشخیص دهند. برچسب‌های pH مبتنی بر آنتوسیانین که درون بسته‌ها یا ساشه‌ها قرار می‌گیرند، می‌توانند برای تعیین تازگی پنیر استفاده شوند. این یافته‌ها استفاده از آن‌ها را برای نظارت بر کیفیت پنیر در طول ذخیره‌سازی پیشنهاد می‌کنند. ابراهیمی تیرتاشی و همکاران (۲۰۱۹) یک نشانگر pH رنگ‌سنجی برای بررسی تخریب شیر پاستوریزه با استفاده از آنتوسیانین‌های هویج سیاه در ماتریس کیتوزان/سلولز تولید کردند. کیتوزان به‌طور مستقیم از سیگمآلدیریج خریداری شد و کاغذ فیلتر وُتمن به‌عنوان ماتریس سلولزی استفاده شد. کاغذ مبتنی بر سلولز با محلول کیتوزان که با روش ژسول تهیه شده و حاوی ABC (محتوای کل آنتوسیانین‌ها ۱۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر) بود، آغشته شد و مشخصات آن تعیین گردید. واکنش رنگی نشانگر پس از ۳۰ روز ذخیره‌سازی در

دمای ۲۰ درجه سانتی گراد مؤثر نشان داده شد. برای ایجاد یک فیلم حساس به pH، زهای و همکاران (۲۰۱۸) از ژلاتین، گلان گام و آنتوسیانینی که از تربچه قرمز استخراج شده بود، استفاده کردند. پس از قرار گرفتن در معرض سطوح مختلف pH (۲۰۰-۱۲۰)، فیلم تغییر رنگ قابل شناسایی از نارنجی قرمز به زرد ایجاد کرد. ویژگی قابل توجه این فیلم، واکنش سریع آن به گازهای فرار بود که امکان شناسایی زود هنگام فساد غذا را فراهم می کرد. جی. لیو، وانگ و همکاران (۲۰۱۹) و وی. لیو، وانگ و همکاران (۲۰۱۹) فیلمی با پاسخ به pH با استفاده از کراپینان K و مقادیر مختلف آنتوسیانین استخراج شده از *Lycium ruthenicum* برای فرموله کردن نشانگر تازگی ایجاد کردند. پس از تماس با مقادیر مختلف pH، فیلم از صورتی به زرد (۲۰۰-۱۰۰) تغییر کرد. در pH پایین ۴.۷۵، مقدار a (که نشان دهنده فساد میکروبی است) از ۳.۲۱ به ۹.۷۶ افزایش یافت و رنگ خاکستری بنفش نشانگر را تأیید کرد. فیلم با پاسخ به pH رنگ صورتی تیره ای نشان داد که با افزایش مقدار a به ۲۰.۸۲، نشان دهنده فساد عمده شیر بود. مواز می گودارزی و همکاران (۲۰۲۰) برچسب pH ساخته شده از نشاسته با آنتوسیانین هویج سیاه ایجاد کردند. این برچسب تغییرات رنگی برگشت پذیر و غیرقابل انکار را هنگام تماس با محلول های بافر pH مختلف نشان داد. شیر تازه باعث تغییر رنگ برچسب از سفید به آبی تیره شد. پس از یک روز، رنگ شیر به بنفش کمرنگ تغییر کرد که نشان دهنده تازگی متوسط بود. وقتی شیر به مدت ۲ روز دیگر نگهداری شد، رنگ بنفش ظاهر شد که نشان دهنده فساد بود. این یافته ها توانایی نشانگر را در تشخیص بین شیر تازه و شیر با درجات مختلف تخریب برجسته کردند. ارزیابی رابطه بین pH، اسیدیته و تعداد کل میکروبی می تواند روشن کند که این نشانگرها چگونه می توانند برای نظارت بر تازگی شیر استفاده شوند.

## ۳.۲. محصولات گوشتی و طیور

استفاده از بسته بندی هوشمند مبتنی بر زیست مواد در صنایع مرتبط با گوشت قرمز، مرغ، ماهی و گوشت فرآوری شده شامل مواد مشتق شده از منابع زیستی و فناوری های پیشرفته برای افزایش ایمنی و ماندگاری این محصولات است. به عنوان مثال، ابلیتی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی استفاده از پلیمرهای زیست مینا با ترکیبات بیواکتیو در توسعه مواد برای بسته بندی محصولات ماهی پرداخته اند. این فناوری ها می توانند به اقلام گوشتی فاسدشدنی کمک کنند زیرا مصرف کنندگان می توانند کیفیت آن ها را درون بسته مشاهده کنند (Panea et al, ۲۰۱۴). برای ایجاد بسته بندی هوشمند، ابزارهایی مانند حسگرها، آشکارسازها، نشانگرها و سیستم های شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) به منظور شناسایی و هشدار به مصرف کنندگان در مورد هرگونه تغییر کیفیت در گوشت در شرایط ذخیره سازی یکپارچه می شوند. حسگرهای گاز نیز می توانند برای انواع مختلف گوشت به طور "لحظه ای" با نظارت بر فساد احتمالی ناشی از فرآیندهای میکروبی و/یا شیمیایی مانند اکسیداسیون چربی و/یا فعالیت آب بیش از حد، که همه منجر به فساد گوشت می شود، استفاده شوند (Pacquit et al, ۲۰۰۶). شاخص های اصلی فساد در محصولات گوشتی شامل تغییرات رنگ و طعم، کاهش تردی و تغییرات در سطوح pH هستند که به همراه بسته بندی آسیب دیده و نشت دار معمولاً منجر به رد مصرف کننده و از دست دادن مالی می شود (Ahmed et al, ۲۰۱۸). خدایی و همکاران (۲۰۲۳) فناوری ها و کاربردهای جدیدی را که برای گوشت و بسته بندی آن معرفی شده اند، مرور کردند. آن ها بر اهمیت کنترل مقدار ترکیبات هوشمند مورد استفاده در بسته بندی هوشمند به دلیل تأثیر مستقیم آن ها بر کیفیت، ارزش غذایی کل و قیمت نهایی اقلام گوشتی تأکید کردند. پذیرش بسته بندی در جو اصلاح شده (MAP) یک فناوری حیاتی است که به طور گسترده ای در زنجیره توزیع سرد برای توزیع، ذخیره سازی و نمایش اقلام گوشت و طیور استفاده می شود. تحقیقات فعلی بر روی منابع طبیعی و ارگانیک تجدید پذیر متمرکز است تا مواد نانوکامپوزیتی زیستی برای بسته بندی هوشمند مواد غذایی توسعه یابد که می تواند رسانه های حسگری و شناسایی مؤثری فراهم کند و مسائل ایمنی را کاهش دهد. فیلم های زیست تجزیه پذیر با استفاده از مواد اولیه از منابع کشاورزی و دریایی، مانند سلولز، پروتئین و



ماتریس‌های مبتنی بر چربی، که حاوی افزودنی‌های ضد میکروبی زیست‌مبنا هستند، ساخته می‌شوند (Dirpan et al, ۲۰۲۲; Suppakul et al, ۲۰۰۳). افزودن عوامل ضد میکروبی به بسته‌بندی، تکثیر باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌ها را متوقف کرده و ایمنی و ماندگاری محصولات گوشتی را افزایش می‌دهد. مرورها و بررسی‌هایی درباره کاربرد و عملکرد اثرات ضد میکروبی در بسته‌بندی هوشمند در مواد بسته‌بندی گوشت موجود است. کری و همکاران (۲۰۰۶) و اولرآسیا و همکاران (۲۰۲۱) از عصاره‌های آنتوسیانین کلم بنفش به‌عنوان نشانگر تشخیص pH برای ایجاد برچسب‌های هوشمند برای تشخیص تازگی گوشت گاو استفاده کردند. چگالی رنگ این ماده زیست‌مبنا برای این منظور مناسب تشخیص داده شد. یک گزارش دیگر استفاده از سلولز از *Acetobacter xylinum* برای ایجاد بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست‌مواد را توصیف می‌کند که امکان شناسایی تغییرات کیفیت و افزایش تازگی گوشت تازه را فراهم می‌کند (Dirpan et al, ۲۰۲۲). در این مورد، سیستم بسته‌بندی هوشمند از محلول برموتیمول بلو استفاده کرد که رنگ سبز تیره‌ای را از نارنجی به‌هنگام شروع فساد گوشت گاو نشان می‌دهد. محققان دریافتند که غلظت‌های بالای عصاره سیر در بسته‌بندی فعال می‌تواند عمر مفید گوشت را ۴ ساعت افزایش دهد. در کل، بسته‌بندی هوشمند مبتنی بر زیست‌مواد ایمنی و کیفیت محصولات گوشتی را افزایش می‌دهد و در عین حال استفاده از مواد فعال، مهاجرت ذرات و خطر آلودگی باکتریایی ناشی از فرآیندهای صنعتی را به حداقل می‌رساند.

### ۳.۳. داروسازی

تولیدکنندگان دارو و مصرف‌کنندگان از بسته‌بندی هوشمند امروزی بهره‌مند می‌شوند که با استفاده از فناوری‌های جدید، مواد نوآورانه و طراحی‌های دقیق، ایمنی و کارایی محصولات را افزایش می‌دهد. فناوری‌های بسته‌بندی هوشمند برای داروها اکنون با عملکردهای اضافی و بهبود یافته‌ای همراه هستند، از جمله ردیابی دارو، مکانیزم‌های هشدار برای سطوح تأمین دارو، یادآوری زمان و دوز مصرف، و به‌عنوان وسیله‌ای برای ارتباط با ارائه‌دهندگان خدمات بهداشتی (Blankenbach et al, ۲۰۱۸). سیستم icabiNET در بسته‌بندی هوشمند، مصرف دارو را نظارت کرده، یادآورهای دارویی ارسال می‌کند و به بیماران اطلاع می‌دهد زمانی که داروها فراموش شده‌اند (LopezNores et al, ۲۰۰۸). فناوری‌های شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) در بسته‌بندی هوشمند می‌توانند زمان دریافت دارو توسط بیمار و مقدار مصرف‌شده را ثبت کنند. یکی از جدیدترین اختراعات در این زمینه، برنامه مبتنی بر RFID به نام "کشوی هوشمند" است که می‌تواند مکان دارو را ردیابی کند. بسته‌بندی واکسن با کنترل دما، این‌هلرهای هوشمند و بسته‌های قرص هوشمند که زمان و تاریخ مصرف داروهای خوراکی را ثبت می‌کنند، نیز از جمله نوآوری‌های اخیر در این حوزه هستند (Rydzkowski et al, ۲۰۲۲). بسته‌بندی هوشمند در بخش داروسازی، رعایت دارو توسط بیماران را بهبود بخشیده و خطاهای دارویی را کاهش داده است، زیرا اطلاعات نمایش داده شده بر روی بسته، دقیق‌تر از بسته‌بندی‌های سنتی است.

### ۴. چشم‌انداز صنعتی و آگاهی و ادراک مصرف‌کنندگان از بسته‌بندی هوشمند زیست‌مبنا

تلاش‌های گسترده‌ای به‌سوی صنعتی‌سازی مواد زیست‌مبنا برای کاهش تأثیرات بهداشتی و محیطی مرتبط با پلاستیک‌های یکبار مصرف در بخش بسته‌بندی غذا معطوف شده است. این شامل پلیمرهای طبیعی مانند سلولز، کیتوزان، نشاسته، آلژینات و پروتئین، و همچنین پلیمرهای زیست‌مبنا سنتزی مانند اسید پلی‌لاکتیک (PLA)، پلی‌بوتیلن سوکینات (PBS) و پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHAs) است که برای کاربردهای مختلف بسته‌بندی غذا، مانند فیلم‌های بسته‌بندی برای پوشش مواد غذایی؛ سینی‌ها و کاسه‌های سخت برای میوه‌ها، سبزیجات و محصولات نانوائی؛ لیوان‌ها و شیشه‌ها برای نوشیدنی‌ها، قهوه و چای و غیره استفاده می‌شود.



(NilsenNygaard et al, ۲۰۲۱). با وجود پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچنان وجود دارد، از جمله تغییرپذیری و ناهمگنی مواد خام زیست‌مبنا از دسته‌ای به دسته دیگر؛ ناکافی بودن مواد زیست‌مبنا برای آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس؛ ناکافی بودن تجزیه و تحلیل‌های چرخه عمر و اقتصادیفنی؛ پیچیدگی‌های مربوط به نهادهای نظارتی؛ و تأثیرات محیطی نامشخص در بلندمدت. پیچیدگی‌های نظارتی و تأثیرات محیطی نامشخص در بلندمدت به کاهش سطح آمادگی فناوری (TRL) کمک می‌کند. همکاری بین دانشگاه و صنعت برای غلبه بر این چالش‌ها بسیار حیاتی است (Peelman et al, ۲۰۱۳; Tardy et al, ۲۰۲۳).

ادراک مصرف‌کنندگان از محصولات زیست‌مبنا چندوجهی است و تحت تأثیر مواجهه، دانش، باورها و عوامل اجتماعی‌جمعیتی قرار دارد. با وجود ابتکارات جهانی بسته‌بندی زیست‌مبنا پایدار، ابهامات مصرف‌کنندگان به دلیل اطلاعات محدود درباره پتانسیل محصولات زیست‌مبنا ادامه دارد (Ruf et al, ۲۰۲۲). ادراکات متنوعی وجود دارد؛ به عنوان مثال، پلیمرهای مبتنی بر چوب به عنوان کمتر پایدار از نظر زیست‌محیطی نسبت به مقوا در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که بیوپلاستیک‌ها با کاغذ و شیشه برابر دانسته می‌شوند (Friedrich, ۲۰۲۰). عواملی مانند قیمت، کارایی، راحتی، گواهی‌نامه‌ها و تولید داخلی بر ترجیحات مصرف‌کنندگان تأثیر می‌گذارد (DilkesHoffman et al, ۲۰۱۹). علاوه بر این، گواهی‌نامه‌ها، ویژگی‌های پایان عمر و تولید داخلی مواد اولیه به عنوان ویژگی‌های حیاتی مطرح شده‌اند (Barnes et al, ۲۰۱۱; Koutsimanis et al, ۲۰۱۲). همچنین، طراحی بسته‌بندی، چه به طور علنی و چه به طور پنهانی با دوستدار محیط زیست مرتبط باشد، تأثیر زیادی بر ادراکات مصرف‌کنندگان دارد. به عنوان مثال، رنگ بسته‌بندی و جذابیت بصری؛ بسته‌بندی ساخته شده از مواد بازیافتی؛ برچسب‌ها، برندها، رنگ‌ها و تصاویری که تأثیرات زیست‌محیطی را به تصویر می‌کشند؛ و توافق‌نامه‌های مجوز، همگی به افزایش خرید محصولات کمک کرده‌اند (Branca et al, n.d). ایجاد معیارهای دقیق، گواهی‌نامه‌ها و برچسب‌گذاری شفاف برای محصولات زیست‌مبنا ضروری است. همکاری بین ذینفعان برای افزایش آگاهی عمومی از طریق کمپین‌ها، تبلیغات و فعالیت‌های ارتباطی مؤثر ضروری است.

## ۶. نتیجه‌گیری

استفاده از بسته‌بندی هوشمند زیست‌مبنا می‌تواند راه‌حلی برای چالش‌های کنونی مرتبط با خنثی‌سازی کربن و ایمنی غذا باشد. این نوع بسته‌بندی همچنین با استفاده از مواد و فناوری‌های تجدیدپذیر، پایداری را ترویج کرده و ضایعات غذایی را کاهش می‌دهد. این بسته‌ها شامل سه جزء کلیدی هستند: مواد بسته‌بندی خود، مکانیزم‌های هوشمند دخیل و افزودنی‌های حفظ‌کننده غذا، و مواد حسگر تجدیدپذیر عملکردی. بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی که شامل نشانگرهای پیشرفته pH و گاز است، پتانسیل انقلابی در صنعت غذا دارد. استفاده از سیستم‌های الکتروشیمیایی و رنگ‌سنجی با رنگدانه‌های طبیعی، امکان تشخیص pH گسترده‌ای را فراهم می‌کند. زیرلایه‌های دوستدار محیط زیست مانند نشاسته و کیتوزان پایداری را افزایش می‌دهند. بیوسنسورهای الکتروشیمیایی با آنزیم‌ها و آنتی‌بادی‌ها دقت را تضمین می‌کنند، از جمله بیوسنسورهای مبتنی بر DNA برای تشخیص مواد سرطان‌زا. بیوسنسورهای صوتی صدا را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند، در حالی که حسگرهای گاز، مانند مواد مبتنی بر PLA و PPC که آمونیاک را شناسایی می‌کنند، نظارت بر فساد را بهبود می‌بخشند. حسگرهای گاز زیست‌مبنا با استفاده از مواد تجدیدپذیر راه‌حل‌های دوستدار محیط زیست را ارائه می‌دهند، در حالی که اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی و پلیمرهای هدایتی مؤثر هستند، اما در دماهای بالا با چالش‌هایی مواجه‌اند. افزودن رنگ‌های طبیعی بعدی دوستدار محیط زیست به TTIs می‌افزاید. در بسته‌بندی غذاهای دریایی، TTIs با نظارت بر دما و جلوگیری از تولید سموم ایمنی را تضمین می‌کنند و با دستورالعمل‌های نظارتی هم‌راستا هستند. مطالعات بر روی روابط زمان تأخیر دقیق برای نظارت مؤثر بر ایمنی غذا تأکید می‌کنند. با وجود این بدنه در حال رشد تحقیقات علمی در



مورد مواد زیست‌مبنا و تجدیدپذیر با پیشرفت‌های فناوری تولید، انجام تجزیه و تحلیل‌های دقیق چرخه عمر، اقتصادی، صنعتی و ادراک کاربر ضروری است. این تجزیه و تحلیل‌ها برای تعیین تأثیر واقعی زیست‌محیطی و اقتصاد اجتماعی راه‌حل‌های قابل اجرا ضروری هستند. این مواد می‌توانند ایمنی، کارایی و پایداری توزیع و مصرف محصولات را بهبود بخشند. با این حال، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای کاوش در روش‌های نوآورانه برای ادغام فناوری‌های نوظهور در محصولات و خدمات به‌منظور بهره‌برداری کامل از این فرصت‌ها ضروری است. با وجود این، بسته‌بندی هوشمند زیست‌مبنا می‌تواند فرصت‌های کسب‌وکار جدیدی ایجاد کند، تولید زباله را کاهش دهد و ایمنی محصول را در بخش‌های مختلف تضمین کند. در نهایت، پذیرش بسته‌بندی هوشمند پتانسیل افزایش رضایت مشتری و بهبود ایمنی، کارایی و پایداری توزیع و مصرف محصولات را دارد.

## منابع

- Abelti, A. L. Abera Teka, T. Fikreyesus Forsedo, S. Tamiru, M. Bultosa, G. Alkhtib, A. & Burton, E. (۲۰۲۲). Biobased smart materials for fish product packaging: A review. *International Journal of Food Properties*, ۲۵(۱), ۸۵۷–۸۷۱.
- Aghaei, Z. Ghorani, B. Emadzadeh, B. Kadkhodae, R. & Tucker, N. (۲۰۲۰). Proteinbased halochromic electrospun nanosensor for monitoring trout fish freshness. *Food Control*, ۱۱۱, Article ۱۰۷۰۶۵.
- Ahmed, I. Lin, H. Zou, L. Li, Z. Brody, A. L. Qazi, I. M. Lv, L. Pavase, T. R. Khan, M. U. Khan, S. & Sun, L. (۲۰۱۸). An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. *Packaging Technology and Science*, ۳۱(۷), ۴۴۹–۴۷۱.
- Alizadeh Sani, M. Tavassoli, M. Salim, S. A. Azizilalabadi, M. & McClements, D. J. (۲۰۲۲). Development of green halochromic smart and active packaging materials: TiO<sub>2</sub> nanoparticle and anthocyaninloaded gelatin/κcarrageenan films. *Food Hydrocolloids*, ۱۲۴.
- AlizadehSani, M. Mohammadian, E. Rhim, J. W. & Jafari, S. M. (۲۰۲۰). pHsensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science and Technology*, ۱۰۵, ۹۳–۱۴۴.
- AlizadehSani, M. Tavassoli, M. McClements, D. J. & Hamishehkar, H. (۲۰۲۱a). Multifunctional halochromic packaging materials: Saffron petal anthocyanin loadedchitosan nanofiber/methyl cellulose matrices. *Food Hydrocolloids*, ۱۱۱, Article ۱۰۶۲۳۷.
- AlizadehSani, M. Tavassoli, M. McClements, D. J. & Hamishehkar, H. (۲۰۲۱b). Multifunctional halochromic packaging materials: Saffron petal anthocyanin loadedchitosan nanofiber/methyl cellulose matrices. *Food Hydrocolloids*, ۱۱۱, Article ۱۰۶۲۳۷.
- Almasi, H. Forghani, S. & Moradi, M. (۲۰۲۲). Recent advances on intelligent food freshness indicators; an update on natural colorants and methods of preparation. *Food Packaging and Shelf Life*, ۳۲, Article ۱۰۰۸۳۹.
- Amin, U. Khan, M. K. I. Maan, A. A. Nazir, A. Riaz, S. Khan, M. U. Sultan, M. Munekata, P. E. S. & Lorenzo, J. M. (۲۰۲۲). Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packaging and Shelf Life*, ۳۳.

- Apicella, A. & Incarnato, L. (۲۰۱۹). Oxygen scavengers in food packaging. In Innovative food processing technologies (pp. ۴۸۷–۵۰۶). Elsevier.
- Azman, N. H. Khairul, W. M. & Sarbon, N. M. (۲۰۲۲). A comprehensive review on biocompatible film sensor containing natural extract: Active/intelligent food packaging. Food Control, ۱۴۱.
- Bandyopadhyay, S. Saha, N. Zandraa, O. Pummerová, M. & Saha, P. (۲۰۲۰). Essential oil based PVPCMCBCGG functional hydrogel sachet for 'cheese': Its shelf life confirmed with anthocyanin (isolated from red cabbage) bio stickers. Foods, ۹.(۳)
- Barnes, M. ChanHalbrendt, C. Zhang, Q. Abejon, N. & Barnes, M. (۲۰۱۱). Consumer preference and willingness to pay for nonplastic food containers in Honolulu, USA. Journal of Environmental Protection, ۲(۹), ۱۲۶۴–۱۲۷۳.
- Bibi, F. Guillaume, C. Gontard, N. & Sorli, B. (۲۰۱۷). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. Trends in Food Science and Technology, ۶۲, ۹۱–۱۰۳.
- Blankenbach, K. Duchemin, P. Rist, B. Bogner, D. & Krause, M. (۲۰۱۸). Smart pharmaceutical packaging with Epaper display for improved patient compliance. Digest of Technical Papers SID International Symposium, ۴۹(۱), ۲۷۱–۲۷۴.
- Boukoufi, C. Boudier, A. Maincent, P. Vigneron, J. & Clarot, I. (۲۰۲۲). Foodinspired innovations to improve the stability of active pharmaceutical ingredients. International Journal of Pharmaceutics, ۶۲۳, Article ۱۲۱۸۸۱.
- Branca, G. Resciniti, R. Barry, P. Babin, J. & Hardin, P. B. (n.d.). Sustainable packaging design and the consumer perspective: a systematic literature review.
- Byun, Y. Whiteside, S. Cooksey, K. Darby, D. & Dawson, P. L. (۲۰۱۱).  $\alpha$ Tocopherolloaded polycaprolactone (PCL) nanoparticles as a heatactivated oxygen scavenger. Journal of Agricultural and Food Chemistry, ۵۹(۴), ۱۴۲۸–۱۴۳۱.
- Chausali, N. Saxena, J. & Prasad, R. (۲۰۲۲). Recent trends in nanotechnology applications of biobased packaging. Journal of Agriculture and Food Research, ۷, Article ۱۰۰۲۵۷.
- Chayavanich, K. Thiraphibundet, P. & Imyim, A. (۲۰۲۰). Biocompatible film sensors containing red radish extract for meat spoilage observation. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, ۲۲۶, Article ۱۱۷۶۰۱.
- Chen, L. H. Li, T. Chan, C. C. Menon, R. Balamurali, P. Shaillender, M. Neu, B. Ang, X. M. Zu, P. Wong, W. C. & Leong, K. C. (۲۰۱۲). Chitosan based fiberoptic Fabry–Perot humidity sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, ۱۶۹, ۱۶۷–۱۷۲.
- Collier, B. B. & McShane, M. J. (۲۰۱۳). In G. L. Coté (Ed.), Enzymatic glucose sensor compensation for variations in ambient oxygen concentration, Article ۸۵۹۱۰۴.
- Cvek, M. Paul, U. C. Zia, J. Mancini, G. Sedlarik, V. & Athanassiou, A. (۲۰۲۲). Biodegradable films of PLA/PPC and curcumin as packaging materials and smart indicators of food spoilage. ACS Applied Materials & Interfaces, ۱۴(۱۲), ۱۴۶۵۴–۱۴۶۶۷.



- da Silva Filipini, G. Romani, V. P. & Guimarães Martins, V. (۲۰۲۰). Biodegradable and active intelligent films based on methylcellulose and jambolão (*Syzygium cumini*) skins extract for food packaging. *Food Hydrocolloids*, ۱۰۹, Article ۱۰۶۱۳۹.
- Damaj, Z. Naveau, A. Dupont, L. Hénon, E. Rogez, G. & Guillon, E. (۲۰۰۹). Co(II)(lproline) $\gamma$ (H $\gamma$ O) $\gamma$  solid complex: Characterization, magnetic properties, and DFT computations. Preliminary studies of its use as oxygen scavenger in packaging films. *Inorganic Chemistry Communications*, ۱۲(۱), ۱۷–۲۰.
- de Oliveira Filho, J. G. Bertolo, M. R. V. Rodrigues, M.A. V. Silva, G. da C. de Mendonça, G. M. N. Bogusz Junior, S. Ferreira, M. D. & Egea, M. B. (۲۰۲۲). Recent advances in the development of smart, active, and bioactive biodegradable biopolymerbased films containing betalains. *Food Chemistry*, ۳۹۰.
- de Oliveira, A. C. S. Ugucioni, J. C. da Rocha, R. A. & Borges, S. V. (۲۰۱۹). Development of whey protein isolate/polyaniline smart packaging: Morphological, structural, thermal, and electrical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, ۱۳۶.(۱۴)
- DilkesHoffman, L. Ashworth, P. Laycock, B. Pratt, S. & Lant, P. (۲۰۱۹). Public attitudes towards bioplasticsknowledge, perception and endoflife management.
- Dirpan, A. Djalal, M. & Kamaruddin, I. (۲۰۲۲). Application of an intelligent sensor and active packaging system based on the bacterial cellulose of acetobacter xylinum to meat products. *Sensors*, ۲۲.(۲)
- Du, H. Sun, X. Chong, X. Yang, M. Zhu, Z. & Wen, Y. (۲۰۲۳). A review on smart active packaging systems for food preservation: Applications and future trends. *Trends in Food Science and Technology*, ۱۴۱.
- Ebrahimi Tirtashi, F. Moradi, M. Tajik, H. Forough, M. Ezati, P. & Kuswandi, B. (۲۰۱۹). Cellulose/chitosan pHresponsive indicator incorporated with carrot anthocyanins for intelligent food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, ۱۳۶, ۹۲۰–۹۲۶.
- Ellouze, M. & Augustin, J.C. (۲۰۱۰). Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products. *International Journal of Food Microbiology*, ۱۳۸(۱–۲), ۱۱۹–۱۲۹.
- Endoza, T. F. M. Welt, B. A. Otwell, S. Teixeira, A. A. Kristonsson, H. & Balaban, M. O. (۲۰۰۶). Kinetic parameter estimation of timetemperature integrators intended for use with packaged fresh seafood. *Journal of Food Science*, ۶۹(۳), ۰۰۰۰۹۰–۰۰۰۰۹۶.
- Ezati, P. Tajik, H. Moradi, M. & Molaei, R. (۲۰۱۹). Intelligent pHsensitive indicator based on starchcellulose and alizarin dye to track freshness of rainbow trout fillet. *International Journal of Biological Macromolecules*, ۱۳۲, ۱۵۷–۱۶۵.
- Florez, M. GuerraRodríguez, E. Cazon, P. & Vázquez, M. (۲۰۲۲). Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, ۱۲۴.

- Foltynowicz, Z. Bardenshtein, A. Sänglerlaub, S. Antvorskov, H. & Kozak, W. (۲۰۱۷). Nanoscale, zero valent iron particles for application as oxygen scavenger in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, ۱۱, ۷۴–۸۳.
- Friedrich, D. (۲۰۲۰). Consumer behaviour towards woodpolymer packaging in convenience and shopping goods: A comparative analysis to conventional materials. *Resources, Conservation and Recycling*, ۱۶۳, Article ۱۰۵۰۹۷.
- GlobeNewswire. (۲۰۲۳). Food packaging market value to hit USD ۵۹۲,۸ billion in ۲۰۳۲, at CAGR ۵,۳%. GlobeNewswire News Room.
- Halloub, A. Raji, M. Essabir, H. Nekhlaoui, S. Bensalah, M. O. Bouhfid, R. & Qaiss, A. el kacem (۲۰۲۳). Stable smart packaging betalainbased from red prickly pear covalently linked into cellulose/alginate blend films. *International Journal of Biological Macromolecules*, ۲۳۴(February), Article ۱۲۳۷۶۴.
- Hassan, S. A. Abbas, M. Mujahid, W. Ahmed, W. Ahmad, S. Maan, A. A. Shehzad, A. Bhat, Z. F. & Aadil, R. M. (۲۰۲۳). Utilization of cerealbased husks to achieve sustainable development goals: Treatment of wastewater, biofuels, and biodegradable packaging. *Trends in Food Science & Technology*, ۱۴۰, Article ۱۰۴۱۶۶.
- Hassan, S. A. Abbas, M. Zia, S. Maan, A. A. Khan, M. K. I. Hassoun, A. Shehzad, A. Gattin, R. & Aadil, R. M. (۲۰۲۲). An appealing review of industrial and nutraceutical applications of pistachio waste. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, ۱–۱۹.
- He, X. Pu, Y. Chen, L. Jiang, H. Xu, Y. Cao, J. & Jiang, W. (۲۰۲۳). A comprehensive review of intelligent packaging for fruits and vegetables: Target responders, classification, applications, and future challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, ۲۲(۲), ۸۴۲–۸۸۱.
- Hidayati, N. A. Wijaya, M. W. Bintoro, V. P. Mulyani, S. & Pratama, Y. (۲۰۲۱). Development of biodegradable smart packaging from chitosan, polyvinyl alcohol (PVA) and butterfly pea flower's (*Clitoria ternatea* L.) anthocyanin extract. *Food Research*, ۵(۳), ۳۰۷–۳۱۴.
- Hübert, T. BoonBrett, L. Black, G. & Banach, U. (۲۰۱۱). Hydrogen sensors – a review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, ۱۵۷(۲), ۳۲۹–۳۵۲.
- Hutter, S. Rüegg, N. & Yildirim, S. (۲۰۱۶). Use of palladium based oxygen scavenger to prevent discoloration of ham. *Food Packaging and Shelf Life*, ۸, ۵۶–۶۲.
- Jiang, G. Hou, X. Zeng, X. Zhang, C. Wu, H. Shen, G. Li, S. Luo, Q. Li, M. Liu, X. Chen, A. Wang, Z. & Zhang, Z. (۲۰۲۰). Preparation and characterization of indicator films from carboxymethylcellulose/starch and purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) anthocyanins for monitoring fish freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, ۱۴۳, ۳۵۹–۳۷۲.



## Abstract

The packaging industry ensures that products are stored safely, minimizes waste, and extends shelf life. Bio-based smart packaging has the potential to achieve both sustainability and real-time monitoring of food quality, leading to environmental and health benefits. Smart packaging, which integrates interactive technologies to enhance the shelf life of perishable foods, has become a growing research topic. Traditional packaging, with its limited biodegradability, can contribute to environmental pollution and waste. Consequently, there is an increasing demand for sustainable alternatives, influenced by changes in consumer expectations, product complexity, and attitudes towards sustainability. This study examines the general principles, mechanisms, and prospects of sustainable smart packaging materials, such as wood-based, protein-based, and microbial-based polymers. The importance of bio-based smart packaging in the food industry is emphasized through various scientific principles underlying these novel indicators, including pH and gas indicators, biosensors, time-temperature indicators (TTIs), and gas sensors, focusing on improving the quality and safety of food products. Compared to traditional fossil fuel-based packaging materials, most bio-based smart packaging offers similar functionality. These new materials enhance the safety, efficiency, and sustainability of the distribution and consumption of packaged foods. Therefore, this review can serve as a valuable resource for researchers, manufacturers, and consumers in reducing environmental impacts and promoting sustainable food packaging practices.

**Keywords:** Bio-based smart packaging, food quality monitoring, sustainable packaging solutions, smart packaging technologies.