



حسگرهای زیستی؛ گامی به سوی نسل نوین صنایع غذایی

هما بهمدی^{۱*}، نگار روشنی دهلقی^۲، علی اکرامی^۳

۱- مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲- گروه علوم و صنایع غذایی، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- گروه پرستاری، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلمات کلیدی:

حسگرهای زیستی،

ایمنی مواد غذایی،

نانوفناوری،

بسته‌بندی هوشمند،

پایش برخط

حسگرهای زیستی یکی از نوآورانه‌ترین فناوری‌های چند دهه اخیر در حوزه صنایع غذایی است که با تلفیق دانش زیست‌فناوری، مهندسی مواد و علوم داده، امکان پایش دقیق، سریع و اقتصادی کیفیت و ایمنی مواد غذایی را فراهم کرده است. این سامانه‌ها براساس عناصر زیستی حساس مانند آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا DNA طراحی می‌شوند و قادرند حضور ترکیبات شیمیایی، عوامل بیماری‌زا و آلاینده‌ها را در غلظت‌های بسیار پایین تشخیص دهند. مطالعه حاضر به بررسی مبانی نظری، روند تاریخی و تحولات فناورانه حسگرهای زیستی در صنعت غذا می‌پردازد و کاربرد آن‌ها را در زمینه‌هایی همچون تشخیص آلودگی‌های میکروبی، کنترل کیفیت مواد اولیه، پایش زنجیره تأمین و توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند تحلیل می‌کند. پیشرفت در حوزه‌های نانوفناوری، ریزسامانه‌ها، هوش مصنوعی و اینترنت اشیا موجب افزایش حساسیت و قابلیت اتصال این حسگرها به شبکه‌های پایش هوشمند شده است. با وجود مزایایی نظیر دقت بالا، هزینه پایین و عملکرد برخط، چالش‌هایی شامل پایداری زیستی، تجاری‌سازی و استانداردسازی همچنان پیش‌روی توسعه صنعتی آن قرار دارد. آینده این فناوری بر ادغام آن با سامانه‌های دیجیتالی، مواد زیست‌سازگار و فرآیندهای تولید پایدار استوار است؛ رویکردی که می‌تواند مسیر گذار به صنعت غذایی هوشمند، شفاف و ایمن را تسریع کند و گامی مؤثر در جهت تحقق امنیت غذایی جهانی باشد.

DOI:10.48311/fsct.2026.120406.83144

* مسئول مکاتبات:

h.behmadi@areeo.ac.ir

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، صنایع غذایی دگرگونی‌های عمیقی را تجربه کرده است؛ دگرگونی‌هایی که ریشه در رشد جمعیت، افزایش شهرنشینی، تغییر الگوی مصرف، جهانی‌شدن بازارها و حساسیت روزافزون مصرف‌کنندگان نسبت به سلامت، کیفیت و پایداری دارد [۱]. روندهای نوین اقتصادی و زیست‌محیطی، صنایع غذایی را بیش از هر زمان دیگری تحت فشار قرار داده‌اند تا کیفیت را تضمین، اتلاف منابع را کاهش و ایمنی محصولات را در سطحی بالاتر از استانداردهای موجود تأمین کنند [۲]. در چنین شرایطی، فناوری‌های تحلیلی نوظهور، به‌ویژه فناوری حسگرها و به‌طور خاص حسگرهای زیستی، به‌عنوان ابزارهایی کلیدی در تحول صنعت غذا مطرح شده‌اند [۳]. این فناوری‌ها با ترکیب اصول زیست‌شناسی، شیمی و مهندسی الکترونیک، امکان پایش هوشمند و دقیق کیفیت مواد غذایی را در طول کل زنجیره تأمین فراهم می‌کنند [۴].

وضعیت کنونی صنایع غذایی نشان می‌دهد که با وجود توسعه روش‌های مدرن تولید و نگهداری، همچنان چالش‌های اساسی در تضمین ایمنی و کیفیت وجود دارد [۵]. افزایش تقاضا برای محصولات تازه و فرآوری‌نشده، گسترش زنجیره‌های تأمین بین‌المللی و حساسیت عمومی نسبت به آلودگی‌های میکروبی، شیمیایی و زیست‌محیطی موجب شده‌اند که کنترل مستمر و سریع کیفیت مواد غذایی به ضرورتی غیرقابل‌انکار تبدیل شود. بسیاری از کارخانه‌ها هنوز به روش‌های آزمون آزمایشگاهی متکی هستند که هرچند دقیق‌اند، اما زمان‌بر، پرهزینه و محدود به نمونه‌برداری‌های گزینشی‌اند [۶]. در نتیجه، احتمال ورود مواد ناسالم یا آلوده به زنجیره مصرف‌کنندگان وجود دارد. نبود سیستم‌های نظارت برخط و خودکار باعث

می‌شود کنترل کیفیت در بیشتر موارد جنبه واکنشی داشته باشد و نه پیشگیرانه، موضوعی که می‌تواند خسارات اقتصادی و اعتباری جدی برای تولیدکنندگان در پی داشته باشد [۷، ۸].

در کنار این مسائل، چالش‌های مرتبط با ایمنی، کیفیت و پایداری ابعاد گسترده‌ای یافته‌اند. از منظر ایمنی، تهدیدهای ناشی از میکروارگانیسم‌های پاتوژن، سموم قارچی، فلزات سنگین، باقیمانده آفت‌کش‌ها و افزودنی‌های غیراستاندارد همچنان از مهم‌ترین نگرانی‌های جهانی در حوزه غذا هستند [۳]. از سوی دیگر، کیفیت حسی و تغذیه‌ای محصولات باید در تمام مراحل، از فراوری تا بسته‌بندی و نگهداری، حفظ شود [۹]. پایداری زیست‌محیطی نیز عامل تعیین‌کننده‌ای در سیاست‌های اخیر تولید غذا به شمار می‌رود؛ صنایع ناگزیرند ضمن بهبود بهره‌وری و کاهش ضایعات، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و استفاده از مواد شیمیایی مضر را نیز کنترل کنند [۱۰]. پیوند میان ایمنی، کیفیت و پایداری به قدری نزدیک است که برهم خوردن یکی از آن‌ها، تعادل کل زنجیره غذایی را تهدید می‌کند [۲]. پاسخ به این چالش‌ها مستلزم ابزارهایی است که بتوانند برخط، دقیق و با حداقل دخالت انسانی وضعیت محصولات را ارزیابی کنند و داده‌های واقعی محیط را در سطوح تولید، نگهداری و توزیع فراهم سازند؛ جایی که نقش فناوری حسگرها و به‌ویژه حسگرهای زیستی برجسته می‌شود [۱، ۱۱].

در این میان، فناوری‌های نوین و هوشمند به‌عنوان نیروی محرک تحول در صنایع غذایی مطرح هستند. ظهور حسگرهای زیستی، نانوفناوری، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا^۱ و سیستم‌های پایش خودکار، الگوی نظارت بر کیفیت را از روش‌های واکنشی و مقطعی به مدل‌های پویا، مستمر و یکپارچه تغییر داده‌اند [۱۰]. حسگرهای زیستی به دلیل

1- Internet of Things (IoT)

منظور، در این پژوهش ابتدا مبانی نظری و روند تاریخی تکامل این حسگرها تشریح شده و سپس کاربردهای کلیدی آن‌ها در زمینه‌هایی نظیر تشخیص آلودگی‌ها، کنترل کیفیت و بسته‌بندی هوشمند مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، ضمن بررسی فناوری‌های نوین همگرا با این حسگرها، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها ارزیابی شده و در نهایت با ارائه مطالعات موردی، چشم‌انداز آینده و مسیرهای پژوهشی پیش‌رو ترسیم خواهد شد.

۲- مبانی نظری حسگرهای زیستی

حسگرهای زیستی نسل پیشرفته‌ای از ابزارهای سنجش و پایش هستند که بر پایه تعاملات خاص میان مولکول‌های زیستی و ترکیبات هدف طراحی شده‌اند [۱۰]. این سامانه‌ها قادرند حضور یا غلظت مواد شیمیایی، میکروبی و زیستی را با دقت بالا شناسایی کرده و به سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری تبدیل کنند [۳]. در مقایسه با حسگرهای شیمیایی یا فیزیکی سنتی، حسگرهای زیستی از مؤلفه‌های زنده یا زیست‌مبتنی به‌عنوان عنصر شناسایی بهره می‌برند؛ عناصری که به‌دلیل ویژگی‌های ساختاری و عملکردی خود، دقت و گزینش‌پذیری بی‌نظیری در شناسایی ترکیبات هدف فراهم می‌کنند [۲]. در حسگرهای کلاسیک، اساس تشخیص معمولاً بر واکنش‌های فیزیکی یا شیمیایی غیرزیستی مانند جذب سطحی یا تغییر هدایت الکتریکی استوار است، در حالی که در حسگرهای زیستی شناسایی بر تعاملات اختصاصی زیست‌مولکولی مانند واکنش آنزیم-بستر، آنتی‌ژن-آنتی‌بادی یا جفت‌شدن نوکلئوتیدی متکی است [۱۳]. این ویژگی موجب می‌شود حسگرهای زیستی نسبت به ترکیبات مشابه یا مزاحم در ماتریکس‌های پیچیده غذایی، دقت و گزینش‌پذیری بسیار بالاتری داشته باشند [۱۴].

ترکیب ویژگی‌های شناسایی زیستی با ابزارهای تحلیلی فیزیکی نظیر مبدل‌های الکتروشیمیایی، اپتیکی یا حرارتی، قابلیت شناسایی اختصاصی ترکیبات هدف را با حساسیت بسیار بالا دارند [۵]. آن‌ها می‌توانند حضور پاتوژن‌ها، آلاینده‌ها یا مولکول‌های شاخص فساد را در لحظه آشکارسازی کرده و اطلاعاتی ارزشمند برای تصمیم‌گیری سریع فراهم آورند [۳]. ادغام این حسگرها در خطوط تولید و بسته‌بندی هوشمند به کاهش ضایعات غذایی، افزایش دقت در کنترل فرآیندها و ارتقای شفافیت زنجیره تأمین کمک می‌کند. افزون بر آن، اتصال حسگرهای زیستی به شبکه‌های داده مبتنی بر اینترنت اشیا امکان تحلیل و تفسیر کلان‌داده‌های کیفی و پیش‌بینی رخدادهای احتمالی فساد یا آلودگی را فراهم می‌سازد [۱۲].

از سوی دیگر، توسعه حسگرهای زیستی نه تنها پاسخی فناورانه به نیازهای فعلی است بلکه بستری برای آینده‌ای پایدار در صنایع غذایی فراهم می‌کند [۲]. این فناوری‌ها با قابلیت کوچک‌سازی، هزینه پایین، و سازگاری با محیط زیست، امکان گسترش کاربرد در سطوح مختلف تولید و توزیع را دارند [۱]. در کنار مزایای فنی، استفاده از چنین سامانه‌هایی منجر به افزایش شفافیت، اعتماد مصرف‌کننده و ارتقای سلامت عمومی می‌شود [۱۰]. بدین ترتیب، حسگرهای زیستی می‌توانند پلی میان فناوری و ایمنی غذایی ایجاد کنند؛ پلی که به صنعت غذا اجازه می‌دهد با بهره‌گیری از ابزارهای علمی و هوشمند، محصولاتی سالم‌تر، باکیفیت‌تر و متناسب با اصول پایداری تولید کند [۵].

پیشرفت در حوزه حسگرهای زیستی چشم‌اندازی نو برای آینده صنایع غذایی ترسیم می‌کند و مسیر دستیابی به صنعت غذایی هوشمند و ایمن را هموار می‌سازد. با توجه به اهمیت و گستردگی این موضوع، هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی جامع نقش، تحولات و کاربردهای حسگرهای زیستی در نسل نوین صنایع غذایی است. بدین

۲. حسگرهای ایمنی (ایمونوسنسورها): این حسگرها بر مبنای برهم‌کنش اختصاصی میان آنتی‌ژن و آنتی‌بادی عمل می‌کنند و برای شناسایی آلاینده‌ها، پاتوژن‌ها و سموم غذایی حساسیت بسیار بالایی دارند [۲۳].

۳. حسگرهای ژنومی (DNA/RNA): در این حسگرها، تفکیک و شناسایی مبتنی بر جفت‌شدن توالی‌های مکمل نوکلئوتیدی صورت می‌گیرد. این فناوری در تشخیص سریع عوامل بیماری‌زا، تغییرات ژنتیکی یا آلرژن‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد [۲۴].

۴. حسگرهای سلولی یا میکروبی: این دسته از پاسخ‌های فیزیولوژیکی یا متابولیک سلول‌ها و میکروارگانیسم‌ها در مواجهه با ترکیب هدف استفاده می‌کنند و معمولاً در ارزیابی سمیت زیستی و اثرات محیطی مؤثرند [۲۵].

ترکیب مولفه‌های زیستی با مبدل‌های فیزیکوشیمیایی در یک ساختار یکپارچه، سبب شده حسگرهای زیستی از نظر دقت، سرعت پاسخ و قابلیت استفاده در محل، نسبت به روش‌های متعارف آزمایشگاهی برتری چشمگیری پیدا کنند. این ویژگی‌ها آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای پایش کیفیت، ایمنی و سلامت مواد غذایی تبدیل کرده است و زمینه را برای حرکت به سوی نسل هوشمند صنایع غذایی فراهم می‌سازد [۲۶، ۲۷].

شکل ۱ نمایی شماتیک از اجزای ساختاری و مکانیسم عملکرد حسگرهای زیستی در صنایع غذایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این سامانه‌ها از بسترهای رسانا، غشاها و ماتریس‌های هیدروژلی به همراه نانومواد تقویت‌کننده سیگنال تشکیل شده‌اند که در پاسخ به محرک‌هایی نظیر تغییرات pH، دما و غلظت زیست‌مولکول‌ها، پاسخ‌های هوشمند

هر حسگر زیستی به‌طور کلی از سه بخش تشکیل می‌شود: بیورسپتور، مبدل سیگنال^۲ و سیستم خوانش و پردازش^۳. بیورسپتور^۱ قلب اصلی سیستم است و وظیفه شناسایی اختصاصی ماده هدف را بر عهده دارد [۱۵]. این جزء می‌تواند شامل آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها، اسیدهای نوکلئیک (DNA/RNA)، یا حتی سلول‌ها و بافت‌های زنده باشد [۱۶]. عملکرد آن بر پایه واکنش‌های زیستی انتخابی است که در حضور ترکیب مورد نظر فعال شده و موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی محیط می‌شود [۳]. مبدل، این تغییر را به سیگنالی قابل اندازه‌گیری مانند تغییر در جریان، ولتاژ، جذب نوری یا جرم سطحی تبدیل می‌کند. مبدل‌ها می‌توانند از نوع الکتروشیمیایی، نوری، ترمال یا پیزوالکتریک باشند و نقش حیاتی در حساسیت و پایداری حسگر ایفا می‌کنند [۱۷، ۱۸]. در مرحله بعد، سیستم خوانش وظیفه تقویت، فیلتر و پردازش سیگنال را بر عهده دارد و داده‌ها را به فرم دیجیتال یا عددی قابل تفسیر تبدیل می‌کند [۱۹]. ادغام این سه بخش در قالب یک سامانه فشرده و کارآمد، به حسگرهای زیستی توانایی تشخیص سریع و دقیق در محیط‌های پیچیده را می‌بخشد [۲۰].

از نظر طبقه‌بندی، حسگرهای زیستی بسته به ماهیت عنصر شناسایی (بیورسپتور) به چند گروه اصلی تقسیم می‌شوند [۲۱]:

۱. حسگرهای آنزیمی: این حسگرها از واکنش‌های اختصاصی آنزیم با بستر استفاده می‌کنند و معمولاً برای سنجش ترکیباتی مانند گلوکز، آمین‌ها، لاکتات یا نیتريت‌ها به کار می‌روند. این دسته دقیق، سریع و مناسب برای تشخیص کمی ترکیبات هدف است [۲۲].

کنترل کیفیت، پایش فساد، شناسایی پاتوژن‌ها و توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی امکان‌پذیر می‌سازد.

رنگ‌سنجی، الکتریکی یا نوری ایجاد می‌کنند. این ویژگی‌های پاسخ‌پذیر، کاربرد حسگرهای زیستی را در

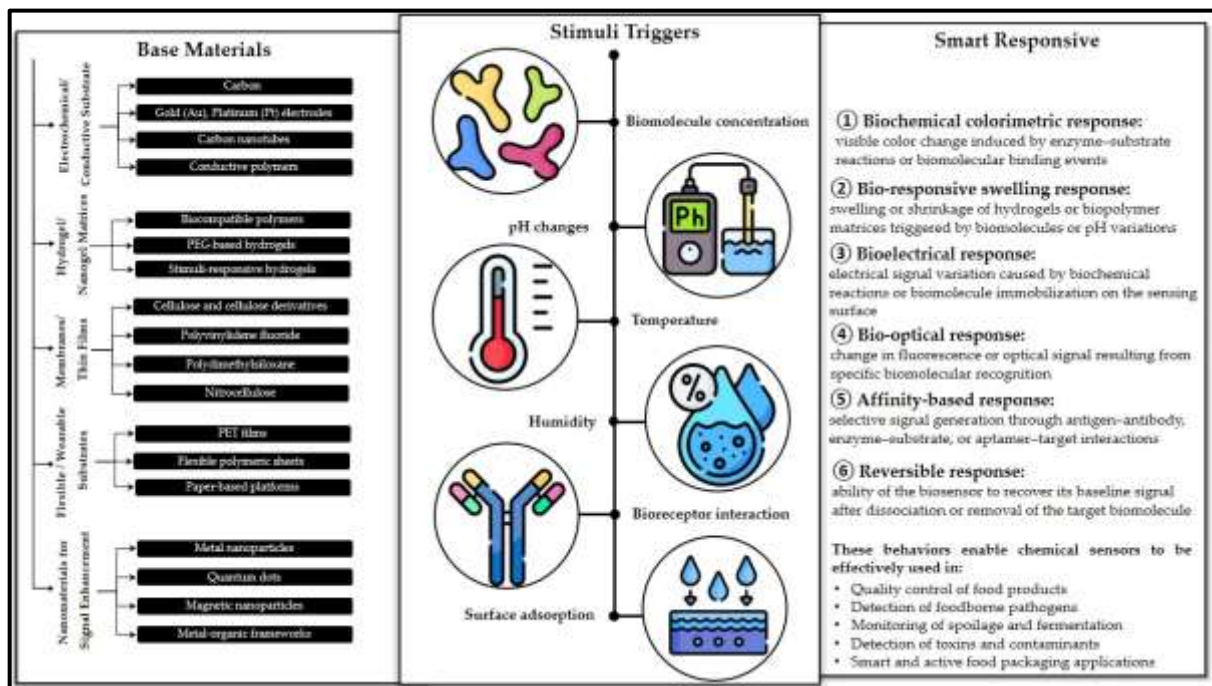


Figure 1- Theoretical foundations of biosensors

به روش‌های اندازه‌گیری سریع ترکیباتی نظیر قند، الکل، اسیدلاکتیک و آمونیاک احساس می‌شد. در همین دوران، حسگرهای آنزیمی ساده به‌طور موفق برای کنترل فرآیند تخمیر و تعیین زمان بهینه تولید مورد استفاده قرار گرفتند و اساس کاربرد صنعتی این فناوری را بنا نهادند [۱۳، ۲۹]. در دهه‌های بعد، پیشرفت فناوری مواد، الکترونیک و زیست‌شناسی مولکولی موجب گسترش سریع دامنه کاربرد حسگرهای زیستی شد [۲۹]. در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، معرفی حسگرهای ایمنی و DNA-بنیاد، امکان شناسایی اختصاصی آلودگی‌های میکروبی و عوامل بیماری‌زا در مواد غذایی را فراهم ساخت [۳۰]. در همین دوران، روش‌های الکتروشیمیایی جایگاه ویژه‌ای یافتند، زیرا دقت بالا، هزینه اندک و قابلیت طراحی قابل حمل داشتند. در دهه ۲۰۰۰، توسعه فناوری‌های میکروسیستم‌ها و ساخت تراشه‌های میکرولیتری، راه را برای کوچک‌سازی حسگرها و انجام آزمون‌های هم‌زمان چندپارامتری هموار کرد [۳۱]. پیشرفت در مهندسی زیستی نیز سبب شد

۳- تاریخچه و روند تکامل حسگرهای زیستی در صنایع غذایی

پیدایش حسگرهای زیستی به دهه ۱۹۶۰ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که «کلارک» و «لیونس» نخستین الکتروود گلوکز آنزیمی را به‌عنوان نمونه‌ای از حسگر زیستی توسعه دادند [۲۸]. این طرح که بر مبنای واکنش آنزیم گلوکز اکسیداز با اکسیژن عمل می‌کرد، سنگ‌بنای شکل‌گیری حوزه‌ای نو در ابزارسازی تحلیلی بود [۳]. هدف اولیه استفاده از حسگرهای زیستی، افزایش سرعت و سهولت اندازه‌گیری ترکیبات زیستی در حوزه پزشکی بود، اما به‌تدریج ارزش بالقوه این فناوری در صنایع غذایی و کشاورزی نیز آشکار شد [۵]. نخستین کاربردهای صنعتی حسگرهای زیستی عمدتاً در کنترل کیفیت محصولات تخمیری مانند نوشیدنی‌ها، لبنیات و فرآورده‌های گوشتی متمرکز بود؛ حوزه‌ای که نیاز فوری

سه‌بعدی برای تولید انبوه، و ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی در تحلیل داده‌ها از جمله دستاوردهایی است که ظرفیت‌های این فناوری را فراتر از ابزارهای تحلیلی سنتی برده است. بدین ترتیب، مسیر تکامل حسگرهای زیستی از ابزارهای ساده آزمایشگاهی به سامانه‌های هوشمند و خودکار در صنعت غذا نه تنها استمرار پیشرفت علمی را نشان می‌دهد، بلکه بیانگر گذار صنایع غذایی به سوی نسلی پایدار، دقیق و داده‌محور است [۲، ۳، ۳۶].

۴- کاربردهای حسگرهای زیستی در صنایع غذایی

کاربرد حسگرهای زیستی در صنایع غذایی طی سال‌های اخیر به یکی از محورهای کلیدی نوآوری در حوزه ایمنی، کیفیت و پایداری مواد غذایی تبدیل شده است [۱۰]. این فناوری‌ها با استفاده از قابلیت‌های تشخیص اختصاصی زیست‌مولکول‌ها، امکان شناسایی ترکیبات و آلودگی‌های گوناگون را در مقیاس‌های زمانی کوتاه فراهم کرده و مسیر نظارت بر مواد غذایی از روش‌های سنتی آزمایشگاهی به سوی پایش بلادرنگ و غیرمخرب سوق داده‌اند [۳]. ترکیب این حسگرها با سامانه‌های دیجیتال و داده‌محور، بستری را ایجاد کرده است که از مزرعه تا میز مصرف‌کننده جریان ایمن و شفاف اطلاعات کیفیت غذا برقرار باشد [۳].

۴-۱- تشخیص آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های کاربرد حسگرهای زیستی، تشخیص آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی در مواد غذایی است [۳]. پاتوژن‌های غذایی، سموم قارچی (مانند آفلاتوکسین‌ها)، بقایای آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین همواره از مهم‌ترین تهدیدهای ایمنی غذایی بوده‌اند [۳۷، ۳۸]. روش‌های کلاسیک شناسایی، مانند کشت میکروبی یا کروماتوگرافی، هرچند دقیق‌اند اما زمان‌بر و پرهزینه بوده و معمولاً نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده هستند [۲]. حسگرهای زیستی با بهره‌گیری از المان‌های بیولوژیک مانند

بیورسپتورهای جدیدی شامل آنتی‌بادی‌های مونوکلونال، آپتامرها و نانواُنزیم‌ها طراحی شوند که نسبت به نسخه‌های پیشین پایداری و حساسیت بیشتری داشتند [۳۲]. در نتیجه، حسگرهای زیستی در این دوره از ابزارهای تحقیقاتی به تجهیزات کاربردی صنعتی تبدیل شدند و در حوزه‌هایی مانند تشخیص پاتوژن‌ها، ارزیابی فساد و سنجش تازگی مواد غذایی جایگاه تثبیت‌شده‌ای یافتند [۵].

با ورود به قرن بیست‌ویکم، حسگرهای زیستی وارد مرحله‌ای نوین از تکامل شدند؛ مرحله‌ای که در آن روندهای فناوری جدید نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. نانوفناوری زمینه‌ساز طراحی نسل تازه‌ای از نانوحسگرها شده است که با بهره‌گیری از نانولوله‌های کربنی، نانوذرات فلزی، کوانتوم‌دات‌ها و مواد دوبعدی مانند گرافن، حساسیت و حد تشخیص را تا چندین برابر بهبود بخشیده‌اند [۳۳]. این نانوساختارها امکان عاملی‌سازی سطح و افزایش سطح تماس زیستی را فراهم می‌کنند و در نتیجه واکنش‌های شناسایی با سرعت و دقت بالاتری انجام می‌گیرد [۳]. به موازات آن، توسعه فناوری ریزسامانه‌ها و میکروفلوئیدیک‌ها امکان انجام چندین واکنش بیوشیمیایی به صورت هم‌زمان در تراشه‌های کوچک را فراهم کرده است که برای پایش سریع و برخط مواد غذایی بسیار سودمند است [۳۴]. علاوه بر آن، حسگرهای هوشمند و یکپارچه با اینترنت اشیا (IoT) نسل تازه‌ای از سامانه‌های پایش خودکار را شکل داده‌اند [۳۵]. در این سیستم‌ها داده‌های حاصل از حسگرها به صورت بی‌سیم منتقل و در سامانه‌های تحلیلی ذخیره و تفسیر می‌شود، به گونه‌ای که کنترل کیفیت و ایمنی مواد غذایی در زمان واقعی ممکن می‌شود [۱۵].

در دهه اخیر نیز جهت‌گیری پژوهش‌ها به سمت پایداری، قابلیت استفاده مجدد، و سازگاری زیست‌محیطی حسگرها سوق یافته است. استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر، چاپ

آنتی‌بادی‌ها، آپتامرها، DNA یا آنزیم‌ها، امکان شناسایی اختصاصی و پرسرعت این آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند [۳۰]. به‌عنوان مثال، حسگرهای زیستی DNA با استفاده از توالی‌های مکمل قادرند حضور پاتوژن‌ها را در کمتر از یک ساعت با حد تشخیص بسیار پایین شناسایی کنند [۲۹]. حسگرهای ایمنی مبتنی بر واکنش آنتی‌ژن-آنتی‌بادی نیز در کنترل وجود سموم قارچی، بقایای دارویی و آلرژن‌ها کاربرد وسیعی یافته‌اند. پیشرفت در نانوفناوری باعث توسعه نانوحسگرهایی شده است که با افزایش سطح تماس واکنش‌دهنده، حساسیت شناسایی را تا حد فمتومولار افزایش داده و امکان پایش سریع آلودگی‌ها را در محل تولید فراهم کرده‌اند [۳۹].

۲-۴- کنترل کیفیت مواد اولیه غذایی

کاربرد دیگر حسگرهای زیستی در کنترل کیفیت مواد اولیه غذایی است. ترکیب‌های شیمیایی مؤثر در ارزش تغذیه‌ای یا ویژگی‌های حسی محصول، مانند پروتئین‌ها، قندها، اسیدهای چرب، ویتامین‌ها و ترکیبات فرار، شاخص‌های اصلی کیفیت مواد غذایی هستند [۲۸]. حسگرهای آنزیمی برای اندازه‌گیری سریع و دقیق این ترکیبات به‌کار می‌روند. در صنایع لبنی، حسگرهای لاکتات اکسیداز و گلوکز اکسیداز برای تعیین میزان قند و ارزیابی شرایط تخمیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۰]. در فرآورده‌های گوشتی نیز حسگرهای آمین‌اکسیداز و پوتریسین برای سنجش ترکیبات حاصل از تجزیه پروتئین‌ها و ارزیابی تازگی محصول استفاده می‌شوند [۴۱]. به کارگیری این ابزارها موجب می‌شود کیفیت مواد خام پیش از ورود به خط تولید ارزیابی گردد و از ورود نمونه‌های ناسالم جلوگیری شود [۴۲].

۳-۴- پایش زنجیره تأمین و پیش‌بینی ماندگاری

در گام بعد، حسگرهای زیستی نقشی تعیین‌کننده در پایش زنجیره تأمین و ماندگاری محصولات ایفا می‌کنند. این حسگرها می‌توانند تغییرات فیزیوشیمیایی مرتبط با فساد،

دما، رطوبت و ترکیبات گازی را در مراحل مختلف نگهداری و حمل‌ونقل رصد کنند [۴۳]. ادغام حسگرهای زیستی در شبکه‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا باعث می‌شود داده‌های مربوط به وضعیت محصولات در زمان واقعی گردآوری و تحلیل شوند [۳۴]. برای مثال، حسگرهای نوری و گازی مبتنی بر آنزیم کاتالاز یا آمین‌اکسیداز، الگوهای تولید گازهای فسادزا مانند آمونیاک و سولفیدها را شناسایی کرده و هشدارهای زودهنگام درباره فساد محصول ارائه می‌دهند [۴۴]. این نوع سامانه‌ها توانسته‌اند ماندگاری واقعی محصولات را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی کرده و به بهینه‌سازی فرایند توزیع کمک کنند. همچنین، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های حسگر، امکان ارزیابی پیش‌بینی‌شده ماندگاری و کیفیت محصول را فراهم ساخته است [۳۵].

۴-۴- بسته‌بندی هوشمند و برچسب‌های زیستی

یکی از حوزه‌های نوظهور و پرکاربرد، بسته‌بندی هوشمند و برچسب‌های زیستی مبتنی بر حسگر است [۴۵]. در این فناوری، حسگرهای زیستی در ساختار بسته‌بندی تعبیه می‌شوند تا تغییرات مرتبط با فساد یا شرایط نگهداری را به طور خودکار ثبت کنند [۶، ۵]. این حسگرها می‌توانند از نوع نوری، رنگ‌سنجی، الکتروشیمیایی یا ایمنی باشند. برای مثال، برچسب‌های رنگ‌زا که شامل آنزیم‌های حساس به ترکیبات فرار آمینی هستند، با تغییر رنگ طی نگهداری می‌توانند وضعیت تازگی گوشت یا ماهی را نشان دهند [۱۰، ۴۶]. نمونه‌های دیگر شامل بسته‌بندی‌هایی با حسگرهای DNA یا آنتی‌بادی هستند که واکنش‌های زیستی را به سیگنال‌های دیداری یا دیجیتالی تبدیل می‌کنند [۳۰]. اتصال این بسته‌بندی‌ها به فناوری‌های بی‌سیم مانند RFID یا NFC نیز امکان ارسال داده‌ها به پایگاه‌های کنترل مرکزی را فراهم کرده است [۴۷]. چنین سیستم‌هایی نقشی دوگانه دارند: از یک‌سو کیفیت و ایمنی محصول را تضمین می‌کنند و از سوی

دیگر اعتماد مصرف‌کننده را از طریق شفافیت در اطلاعات افزایش می‌دهند [۳۵، ۴۸].

حسگرهای زیستی با ترکیب ویژگی‌های زیست‌اختصاصی، حساسیت بالا و قابلیت استفاده در محیط واقعی، به ابزاری کلیدی در مدیریت کیفیت و ایمنی مواد غذایی تبدیل شده‌اند. ادغام این فناوری با سامانه‌های هوشمند، نانومواد، و تحلیل داده‌های پیشرفته مسیر صنعت غذا را به سوی مدل‌های هوشمند، قابل اعتماد و پایدار هدایت می‌کند؛ مدلی که در آن کنترل کیفی دیگر محدود به آزمایشگاه نیست بلکه در هر نقطه از زنجیره تولید و توزیع به صورت هوشمند انجام می‌شود [۲، ۲۸].

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، حسگرهای بیولوژیکی به عنوان شاخص‌های شناسایی

پیشرفته، جایگاه مهمی در پایش ایمنی، کیفیت و فساد مواد غذایی دارند. در این جدول، انواع حسگرهای زیستی بر اساس نوع عنصر زیستی فعال، آنالیت هدف، شاخص شناسایی و مکانیسم شناسایی زیستی به صورت نظام‌مند طبقه‌بندی و مقایسه شده‌اند. افزون بر این، مزایا و محدودیت‌های هر سامانه حسگری با هدف ارزیابی کارایی، دقت و قابلیت کاربرد آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی و صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه شده در جدول ۱ بیانگر ظرفیت بالای حسگرهای بیولوژیکی در توسعه سامانه‌های نوین، هوشمند و مبتنی بر شناسایی اختصاصی در صنایع غذایی آینده است.

Table 1- Applications of biological sensors as identification indicators in the food industry

Referen ces	Limitations	Advanta ges	Biological Recogniti on Mechanis m	Identificati on Indicator	Target Analyte	Active Biological Element	Type of biological sensor
[۴۹]	Enzyme instability	High selectivity	Enzymatic reaction and signal generation	Microbial activity	Glucose, lactate, amines	(Oxidase, Dehydrogenase) Specific enzymes (oxidase, dehydrogenase)	Enzymatic sensor
[۵۰]	Long response time	High sensitivity	Change in biological signal	Microbial growth	Spoilage metabolites	Live bacteria/yeast	Microbial sensor
[۵۱]	High cost	High accuracy	Antigen-antibody binding	Microbial contamination	Toxins, pathogens	Antibody	Immunosensor
[۵۲]	Requires specialized equipment	Very high accuracy	Nucleic acid hybridization	Presence of microorganisms	Pathogen genes	Aptamer, genetic probe	DNA/RNA DNA/RNA sensor
[۵۳]	Complex development	High stability	Selective analyte binding	Specific spoilage	Toxins, metabolites	Synthetic aptamer	Aptamer-based sensor
[۵۴]	Difficult maintenance	Realistic biological simulation	Cellular physiological response	Toxicity	Food toxins	Living cells	Cell-based sensor
[۵۵]	Optical instrumentation required	High sensitivity	Change in fluorescence intensity	Microbial activity	Spoilage metabolites	Fluorescent protein	Biofluorescent sensor

[۵۶]	High fabrication cost	Rapid response	Biological signal amplification	Early spoilage	VOCs, amines	Enzyme/apta mer + nanoparticles	Nano-based biological sensor
[۵۷]	Limited lifespan	Safe, sustainable	Bio-chemical reaction	Overall spoilage	pH, gases	Enzyme/natural biomolecule	Packaging-compatible bio-based sensor

حسگر را تسريع و پديده‌های نويز را کاهش داده‌اند [۶۲]. همچنين، به‌کارگيري نانو ساختارهای ترکیبی (نانوکامپوزیت‌ها) با ویژگی‌های چندگانه - نظير ترکیب نانوذرات فلزی با پلیمرهای رسانا - به تولید حسگرهایی انجامیده که هم حساسیت بالا و هم پایداری طولانی‌مدت دارند [۶۳]. این پیشرفت‌ها کاربرد حسگرهای زیستی را در محیط‌های پیچیده غذایی، که معمولاً چالش‌برانگیزترین بستر برای تشخیص دقیق هستند، امکان‌پذیر کرده است [۶۴].

۲-۵- هوش مصنوعی و اینترنت اشیا

گام بعدی در توسعه حسگرهای زیستی، هوشمندسازی و اتصال آن‌ها به سامانه‌های داده‌محور از طریق هوش مصنوعی و اینترنت اشیا است. در این چارچوب، حسگرهای زیستی صرفاً ابزار اندازه‌گیری نیستند، بلکه به اجزایی از شبکه‌های هوشمند تبدیل شده‌اند که داده‌های کمی و کیفی مربوط به مواد غذایی را در زمان واقعی جمع‌آوری، ذخیره و تحلیل می‌کنند [۵۹، ۶۵]. فناوری اینترنت اشیا با اتصال حسگرها به پایگاه‌های داده ابری، امکان پایش مستمر پارامترهای حیاتی نظیر دما، رطوبت، ترکیبات آلی فرار، و حضور عوامل میکروبی را فراهم می‌سازد [۳۵]. این داده‌ها از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی تحلیل می‌شوند تا روندهای آلودگی، فساد یا کاهش کیفیت شناسایی گردد [۶۵]. الگوریتم‌های هوشمند قادرند الگوهای سیگنال حسگر را طبقه‌بندی کرده و میان نمونه سالم و آلوده تمایز قائل شوند، حتی زمانی که غلظت ترکیبات هدف پایین‌تر از حد تشخیص مستقیم باشد [۶۶]. چنین سیستم‌هایی در صنایع غذایی نقش حیاتی در تصمیم‌گیری خودکار، هشدارهای

۵- فناوری‌های نوین مرتبط با حسگرهای زیستی

پیشرفت‌های اخیر در علوم میان‌رشته‌ای موجب تحول بنیادین در طراحی، عملکرد و کارایی حسگرهای زیستی شده است. ترکیب فناوری‌های نوین در حوزه‌هایی چون نانوفناوری، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و چاپ سه‌بعدی، نسل جدید حسگرهای زیستی را پدید آورده که نسبت به نسخه‌های پیشین از نظر حساسیت، دقت، سرعت پاسخ، و قابلیت یکپارچه‌سازی، برتری قابل توجهی دارند. این فناوری‌ها با ایجاد پیوند میان زیست‌فناوری و مهندسی مواد، حوزه‌ای نو از حسگرهای هوشمند و سازگار با محیط زیست را برای صنایع غذایی گشوده‌اند [۵۸].

۱-۵- نانوفناوری و کاربرد نانومواد

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های پیشرفت در این حوزه، نانوفناوری و به‌کارگیری مواد نانو ساختار در حسگرهای زیستی است [۵۹]. نانومواد به دلیل دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی عالی، و قابلیت عاملی‌سازی سطحی، موجب بهبود چشمگیر عملکرد گیرنده‌های زیستی و مبدل‌ها شده‌اند. استفاده از نانولوله‌های کربنی، گرافن، نانوذرات فلزی (طلا، نقره، پلاتین) و چارچوب‌های فلزی-آلی امکان انتقال سریع‌تر الکترون، افزایش پایداری و تقویت سیگنال را فراهم کرده است [۶۰]. برای نمونه، نانوذرات طلا به‌عنوان بستری زیست‌سازگار در اتصال آنزیم‌ها یا آنتی‌بادی‌ها به سطح مبدل، موجب بهبود حساسیت تشخیص در حد نانومولار شده‌اند [۶۱]. مواد دوبعدی مانند گرافن و ام‌اکسین با هدایت الکترونی بالا و سطح واکنش‌پذیر گسترده، پاسخ

هم‌زمان انجام دهد، هزینه‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهد و نتیجه‌گیری سریع را ممکن سازد [۷۲].

هم‌افزایی میان نانوفناوری، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و فناوری چاپ سه‌بعدی چشم‌اندازی گسترده برای نسل آینده حسگرهای زیستی در صنایع غذایی ایجاد کرده است. این فناوری‌ها زمینه‌ساز طراحی سامانه‌هایی هستند که نه تنها قادر به تشخیص سریع آلودگی یا فساد هستند، بلکه می‌توانند داده‌ها را تحلیل کرده، الگوهای تغییر کیفیت را پیش‌بینی و حتی تصمیم‌گیری اصلاحی را به‌صورت خودکار انجام دهند. در نهایت، این هم‌گرایی فناورانه می‌تواند بنیان صنعت غذایی آینده را، که مبتنی بر هوشمندی، پایداری و شفافیت کامل است، استحکام بخشد و مسیر تحقق ایمنی غذایی جهانی را هموار سازد [۷۲، ۶۹، ۶۵، ۳۸].

شکل ۲ نمایانگر همگرایی فناوری‌های نوظهور در توسعه حسگرهای زیستی صنایع غذایی است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ادغام هوش مصنوعی و اینترنت اشیا با فناوری چاپ سه‌بعدی، ریز/نانوسامانه‌ها و نانوفناوری، امکان پایش بلادرنگ، هشدار زودهنگام و کنترل پیش‌بینانه کیفیت را در خطوط تولید لبنی و نوشیدنی فراهم می‌کند. این هم‌افزایی فناورانه با افزایش حساسیت تشخیص، کاهش ضایعات غذایی و بهبود ردیابی و شفافیت زنجیره تأمین، مسیر استقرار حسگرهای هوشمند در مقیاس صنعتی را هموار می‌سازد.

زودهنگام، و پیش‌بینی کیفیت محصول بر اساس شرایط نگهداری دارند. همچنین، ادغام حسگرهای زیستی با سامانه‌های کنترل فرآیند، امکان بهینه‌سازی خودکار مراحل تولید و کاهش ضایعات را فراهم کرده است [۶۷].

۳-۵- چاپ سه‌بعدی و ریزسامانه‌ها

فناوری چاپ سه‌بعدی و ریزسامانه‌ها نیز از دیگر مسیرهای نوآورانه در توسعه حسگرهای زیستی به‌شمار می‌رود [۶۸]. چاپ سه‌بعدی با فراهم‌سازی قابلیت طراحی ساختارهای میکرومتری دقیق، تولید الگوهای پیچیده و بسیار ظریف برای مبدل‌ها و کانال‌های واکنشی را ممکن کرده است [۶۹]. این فناوری روند تولید حسگرها را از روش‌های زمان‌بر و پرهزینه به فرآیندی سریع، اقتصادی و قابل تنظیم تبدیل کرده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای چاپ سه‌بعدی در ساخت بسترهای متخلخل برای تثبیت عناصر زیستی است که می‌تواند هم انتقال جرم را تسهیل کند و هم بازده واکنش را افزایش دهد [۷۰]. حسگرهای چاپ‌شده سه‌بعدی به دلیل قابلیت تولید انبوه با طراحی اختصاصی، به‌ویژه برای استفاده در بسته‌بندی هوشمند و سیستم‌های پایش زنجیره غذایی مناسب هستند [۷۱]. در کنار آن، ریزسامانه‌های میکروفلوئیدیکی به‌عنوان پلتفرم‌های کوچک و قابل حمل، امکان تحلیل نمونه‌های غذایی در حجم‌های بسیار پایین و با سرعت بالا را فراهم می‌کنند. ترکیب فناوری میکروفلوئیدیک با حسگرهای زیستی منجر به ایجاد «آزمایشگاه روی تراشه» شده است؛ سامانه‌ای که می‌تواند چندین واکنش زیستی را

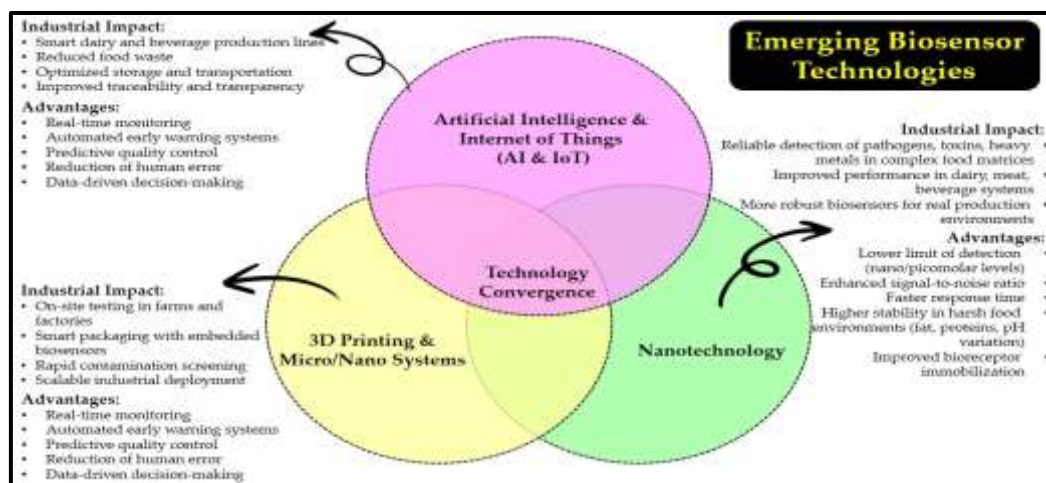


Figure 2- Emerging biosensor technologies

۶- مزایا و محدودیت‌های حسگرهای زیستی در

صنعت غذا

حسگرهای زیستی به‌عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین در حوزه صنایع غذایی، توانسته‌اند بسیاری از محدودیت‌های روش‌های کلاسیک کنترل کیفیت را برطرف کنند و نظارت بر سلامت و ایمنی محصولات را به سطوح دقیق‌تر، سریع‌تر و اقتصادی‌تر ارتقا دهند [۷۳]. این ابزارها با بهره‌گیری از عناصر زیستی انتخاب‌گر مانند آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا DNA، قابلیت تشخیص اختصاصی آلاینده‌ها، ترکیبات شیمیایی و عوامل فساد را در زمان کوتاه و بدون نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده فراهم کرده‌اند [۲]. همین ویژگی‌ها، حسگرهای زیستی را به یکی از ارکان اصلی توسعه صنایع غذایی هوشمند تبدیل کرده است [۱۰].

از مهم‌ترین مزایای حسگرهای زیستی می‌توان به دقت بالا، سرعت پاسخ‌گویی، هزینه پایین و قابلیت اعتماد عملکردی اشاره کرد [۳]. در مقایسه با روش‌های سنتی مانند کروماتوگرافی یا کشت میکروبی، که به دلیل نیاز به تجهیزات گران‌قیمت آزمایشگاهی، حلال‌های شیمیایی خالص، آماده‌سازی پیچیده نمونه و زمان طولانی آنالیز پرهزینه و زمان‌بر هستند، حسگرهای زیستی قادرند در چند ثانیه یا دقیقه نتایج قابل اعتماد ارائه دهند. به‌کارگیری بیورسپتورها موجب افزایش گزینش‌پذیری و کاهش تداخل سیگنال در حضور مواد مزاحم موجود در ماتریکس‌های غذایی شده است [۱۰]. دقت این سامانه‌ها به سطح مولکولی رسیده و حد تشخیص برخی حسگرهای زیستی حتی تا مقادیر پیکومولار یا فمتومولار کاهش یافته است [۵]. از منظر اقتصادی، ساختار ساده و قابلیت تولید انبوه بسیاری از حسگرهای زیستی، هزینه آزمون را به شکل چشمگیری کاهش داده و امکان استفاده گسترده در خطوط تولید و زنجیره تأمین را فراهم کرده است [۲۲].

اگرچه توسعه حسگرهای زیستی برای تمامی کاربردها هنوز در جریان است، اما در موارد متعددی این فناوری‌ها به استاندارد کنترل کیفیت صنعت غذا تبدیل شده‌اند. به‌عنوان نمونه، کیت‌های Delvotest® و SNAP® به‌عنوان استاندارد جهانی صنعت لبنیات جهت پایش اجباری تانکرهای شیر خام به‌کار می‌روند و محصولات AflaTest® و AgraQuant® نیز مورد تأیید سازمان FDA برای سنجش آفلاتوکسین در غلات هستند. افزون بر این، کیت‌های Veratox® و RIDASCREEN® به‌صورت روتین در خطوط تولید شرکت‌های بزرگی نظیر Nestlé و Unilever برای ردیابی آلرژن‌ها استفاده می‌شوند و سیستم BAX® نیز به‌عنوان استاندارد وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) برای تشخیص سالمونلا، به یکی از الزامات تأمین‌کنندگان برندهایی چون McDonald's تبدیل شده است. این شواهد نشان می‌دهند که حسگرهای زیستی نه‌تنها در عالم واقع کاربرد گسترده‌ای دارند، بلکه در بسیاری از موارد به استانداردهای اجباری و جدایی‌ناپذیر صنعت غذا تبدیل شده‌اند [۲۸]. از سوی دیگر، پیشرفت در نانومواد و پلیمرهای رسانا، سبب شده این حسگرها در شرایط محیطی متنوع پایداری عملکردی بالایی داشته باشند و قابلیت استفاده مکرر پیدا کنند. افزون بر آن، قابلیت اتصال حسگرهای زیستی به سامانه‌های دیجیتال و اینترنت اشیا باعث شده پایش برخط کیفیت محصولات و تحلیل داده‌ها به‌صورت خودکار انجام گیرد، که این امر تصمیم‌گیری در فرایند تولید را تسهیل و اعتماد مصرف‌کنندگان را به سلامت محصولات افزایش می‌دهد [۵، ۳۵].

با وجود این مزایا، پیاده‌سازی گسترده حسگرهای زیستی در صنعت غذا هنوز با چالش‌هایی در حوزه فنی، اقتصادی و مقرراتی روبه‌رو است. یکی از موانع اصلی، پایداری محدود بیورسپتورهای زیستی در شرایط واقعی تولید و نگهداری مواد غذایی است [۳۵]. دما، pH، ترکیبات چرب

و آنزیم‌های طبیعی می‌توانند باعث افت حساسیت و کاهش طول عمر حسگر شوند [۱۰]. فرایند کالیبراسیون دقیق نیز به دلیل پیچیدگی ماتریکس‌های غذایی و وجود ترکیبات مزاحم دشوار است [۵]. از منظر بهداشت و ایمنی، استفاده از مواد فعال زیستی یا نانوذرات باید تحت ضوابط سخت‌گیرانه‌ای انجام گیرد تا خطرات احتمالی برای سلامت انسان و محیط زیست به حداقل برسد [۷۴]. در حوزه تجاری‌سازی، هزینه تولید حسگرهای زیستی با کارایی بالا، اگرچه در مقایسه با گذشته کاهش یافته، اما هنوز برای استفاده در مقیاس انبوه در برخی صنایع محدودیت‌هایی دارد [۳]. نبود استانداردهای بین‌المللی و دستورالعمل‌های واحد برای ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی این حسگرها نیز یکی از موانع اصلی پذیرش صنعتی محسوب می‌شود. افزون بر این، تطبیق فناوری‌های نوین حسگری با خطوط تولید موجود نیازمند بازطراحی فرآیندها و آموزش نیروی انسانی است که خود مستلزم زمان و سرمایه‌گذاری قابل توجه است [۷۵].

چشم‌انداز توسعه حسگرهای زیستی در صنعت غذا بسیار روشن است. با پیشرفت در طراحی بیورسپتورها، نانو ساختارها و مواد زیست‌سازگار، انتظار می‌رود دوام،

دقت و قابلیت اطمینان این فناوری بیش‌ازپیش افزایش یابد. همچنین تدوین استانداردهای فنی و معیارهای پذیرش صنعتی می‌تواند مسیر تجاری‌سازی را هموار سازد. ترکیب کارایی بالا و پایداری مناسب با هزینه تولید قابل قبول، آینده‌ای را نوید می‌دهد که در آن حسگرهای زیستی به بخشی جدایی‌ناپذیر از نظام‌های کنترل کیفیت و ایمنی صنایع غذایی تبدیل می‌شوند [۳، ۷۴، ۷۵].

شکل ۳ مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری حسگرهای زیستی در صنایع غذایی را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، این سامانه‌ها با برخورداری از حساسیت و گزینش‌پذیری بالا، قابلیت آشکارسازی سریع و پایش بلادرنگ را فراهم کرده و در عین حال به دلیل ابعاد کوچک، قابلیت حمل و هزینه پایین، برای کاربردهای میدانی و صنعتی بسیار مناسب‌اند. علاوه بر این، ویژگی‌هایی نظیر چندآنالیتی^۵، قابلیت استفاده مجدد و سازگاری با محیط زیست، جایگاه آن‌ها را به عنوان فناوری کلیدی نسل نوین پایش ایمنی و کیفیت مواد غذایی تثبیت می‌کند.

^۵ Multiplexing

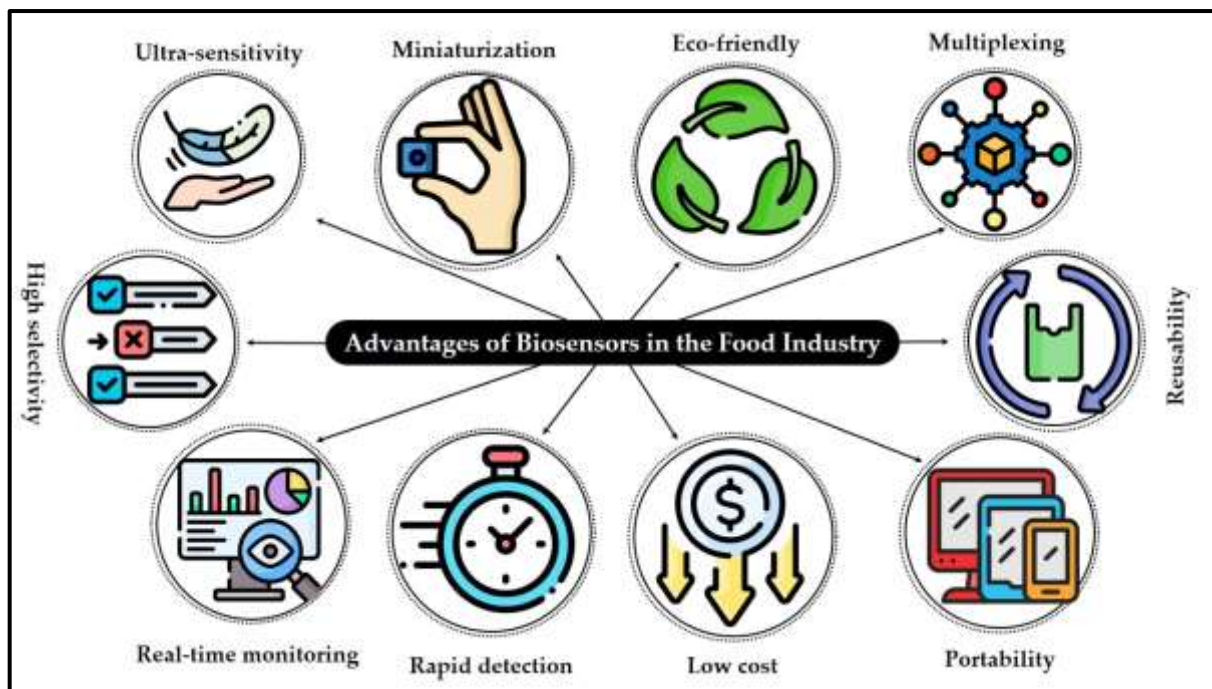


Figure 3- Advantages of biosensors in the food industry

آفلاتوکسین M1 در شیر، حد تشخیص در محدوده نانوگرم بر لیتر را نشان داده‌اند [۲]. علاوه بر آن، بسته‌بندی‌های هوشمند حاوی آنزیم‌های پایدار بر پایه نانومواد در پایش شرایط نگهداری لبنیات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با تغییر رنگ، هشدار فساد را صادر می‌کنند [۷۷].

در صنایع گوشت و فرآورده‌های آن، کنترل فساد و آلودگی باکتریایی اهمیت ویژه‌ای دارد [۴۳]. حسگرهای آمینی مبتنی بر آپتامرها و نانوذرات طلا برای شناسایی آمین‌های بیوزنیک (همچون پوتریسین و کاداورین) توسعه یافته‌اند که رابطه مستقیمی با تازگی گوشت دارند [۶۰]. استفاده از حسگرهای زیستی آمپرومتری برای اندازه‌گیری تغییرات ترکیبات نیتروژنی فرار نیز یکی از روش‌های مؤثر در تعیین مدت ماندگاری محصولات گوشتی محسوب می‌شود. در پژوهش‌های صنعتی، حسگرهای زیستی مبتنی بر پروتئین‌های فلورسانس جهت آشکارسازی آلودگی

۷- مطالعات موردی

کاربردهای عملی حسگرهای زیستی در صنایع مختلف غذایی طی سال‌های اخیر به سرعت گسترش یافته و مسیر گذار از تحقیقات آزمایشگاهی به استفاده صنعتی را هموار کرده است [۳]. مطالعه موردی این کاربردها نشان می‌دهد که حسگرهای زیستی توانسته‌اند در ارزیابی کیفیت، شناسایی آلودگی‌ها و افزایش ماندگاری محصولات نقش بسزایی ایفا کنند [۳۵].

در صنایع لبنی، حفظ کیفیت و پیشگیری از آلودگی میکروبی همواره چالش برانگیز است. حسگرهای زیستی آنزیمی بر پایه لاکتات اکسیداز، گلوکز اکسیداز یا پراکسیداز برای کنترل فرآیند تخمیر، سنجش قند شیر و شناسایی محصولات فسادزا استفاده می‌شوند [۳۵]. حسگرهای ایمنی مبتنی بر آنتی‌بادی نیز توانایی شناسایی سریع لیستریا منوسیتوزن^۶ و استافیلوکوکوس اورئوس^۷ در فرآورده‌های لبنی را طی چند دقیقه فراهم کرده‌اند [۷۶]. در مطالعات اخیر، حسگرهای DNA نیز برای تشخیص

7-Staphylococcus aureus

6 -Listeria monocytogenes

/شرشیا کلی^۸ توانسته‌اند زمان تشخیص را از ۲۴ ساعت به کمتر از ۳۰ دقیقه کاهش دهند [۷۸].

در صنعت نوشیدنی‌ها، به‌ویژه نوشیدنی‌های تخمیری، حسگرهای زیستی به ابزارهای پایش فرآیند تولید تبدیل شده‌اند [۷۹]. کنترل دقیق قند، الکل و اسیدلاکتیک از طریق حسگرهای آنزیمی متداول است. حسگرهای پتانسیومتری برای اندازه‌گیری pH در تخمیر آبجو و نوشیدنی‌های میوه‌ای به کار می‌روند [۸۰]. استفاده از حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی برای شناسایی متانول یا فلزات سنگین در نوشیدنی‌های ادغامی موجب ارتقای سطح ایمنی و کیفیت محصول نهایی شده است [۸۱]. در صنایع غلات و محصولات آردی، حسگرهای زیستی DNA و ایمنی برای تشخیص سریع سموم قارچی مانند آفلاتوکسین‌های B1 و G1 توسعه یافته‌اند. کاربرد این حسگرها به‌خصوص در کنترل کیفیت ذرت، گندم و محصولات ذخیره‌ای اهمیت دارد [۸۲]. همچنین حسگرهای آنزیمی جهت اندازه‌گیری گلوکز، مالتوز و آمیلاز در کنترل فرآیندهای تخمیر نان و شیرینی به کار رفته‌اند که با بهینه‌سازی زمان پخت و خواص بافتی محصول، کیفیت نهایی را بهبود می‌بخشند [۸۳].

نتایج این مطالعات موردی نشان می‌دهد حسگرهای زیستی در تمامی حوزه‌های صنایع غذایی، از لبنیات تا غلات، عملکرد قابل‌اعتماد و سریع‌تری نسبت به روش‌های متداول دارند. به‌ویژه ترکیب آن‌ها با فناوری‌های نانوساختار و سیستم‌های دیجیتالی پایش، مسیر تجاری‌سازی این ابزارها را هموار کرده و نقش آن‌ها را در تضمین ایمنی و ارتقای کیفیت مواد غذایی بیش از پیش پررنگ ساخته است [۳، ۱۰].

۸- چشم‌انداز آینده و مسیرهای پژوهشی

پیشرفت سریع فناوری در حوزه حسگرهای زیستی، آینده‌ای روشن برای تحول صنایع غذایی رقم زده است [۳]. روند پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در دهه آینده، تمرکز بر افزایش دقت، پایداری، و هوشمندسازی این حسگرها، مسیر توسعه را از کاربردهای آزمایشگاهی به استفاده صنعتی و مصرفی هدایت خواهد کرد [۸۴]. در این راستا، نوآوری‌های میان‌رشته‌ای در زیست‌فناوری، مواد پیشرفته و مهندسی داده، ابزارهایی فراهم خواهند ساخت که بتوانند کیفیت، تازگی و سلامت مواد غذایی را در کل زنجیره تأمین به شکل بلادرنگ و با کمترین هزینه پایش کنند [۱۰].

یکی از محورهای اصلی پیشرفت‌های مورد انتظار در دهه آینده، استفاده از نانومواد جدید و سازگار با محیط زیست است که ضمن افزایش حساسیت، از پدیده‌های تخریب یا مسمومیت زیستی جلوگیری می‌کنند [۸۴]. نانوکامپوزیت‌های سبز، پلیمرهای رسانای زیست‌پایه و چارچوب‌های فلزی-آلی قابل بازیافت نقش مهمی در ارتقای دوام و ایمنی حسگرها خواهند داشت [۳۵]. در کنار آن، توسعه بیورسپتورهای مصنوعی با ساختارهای مهندسی‌شده (نظیر آپتامرها و نانوانزیم‌ها) امکان تشخیص ترکیبات پیچیده را با پایداری بیشتر نسبت به گیرنده‌های طبیعی فراهم می‌سازد [۳]. همچنین، استفاده از فناوری‌های میکروفلوئیدیک و «آزمایشگاه روی تراشه» نیاز به حجم بالای نمونه را حذف کرده و پایش در محل را از سطح کارخانه تا فروشگاه ممکن خواهد کرد [۸۵]. در سطح داده، ادغام هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با حسگرهای زیستی، قابلیت تحلیل الگوهای فساد، پیش‌بینی زمان ماندگاری و تصمیم‌گیری خودکار را به‌وجود خواهد آورد. این روند می‌تواند مفهوم «پایش پیشگویانه کیفیت غذا» را به واقعیت تبدیل کند [۸۶].

تحول بعدی به سمت ایجاد صنایع غذایی پایدار و هوشمند است. آینده این صنعت مبتنی بر شبکه‌ای از حسگرهای زیستی و دیجیتال است که در تمام مراحل زنجیره تأمین فعال هستند [۳]. این شبکه‌ها اطلاعات مربوط به ایمنی، ترکیب مواد، شرایط نگهداری و حتی منشأ تولید را در زمان واقعی ثبت و به سامانه‌های مرکزی منتقل می‌کنند [۸۴]. چنین ساختاری شفافیت، قابلیت ردیابی و اعتماد مصرف‌کننده را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از حسگرهای زیستی زیست‌تخریب‌پذیر یا قابل تجزیه، به کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت غذا کمک کرده و با اصول اقتصاد چرخشی همخوانی دارد. پژوهش‌های آینده احتمالاً بر طراحی حسگرهایی متمرکز خواهد بود که به‌صورت بی‌سیم، کم‌هزینه و خودتغذیه عمل کرده و با تحلیل‌های ابری و بلاک‌چین ادغام شوند تا امنیت داده‌ها و اصالت محصولات تضمین گردد [۲، ۱۰].

آینده حسگرهای زیستی فراتر از صرف ابزارهای آزمایش است و به‌سوی ایجاد سامانه‌های هوشمند و خودکار هدایت می‌شود که محور آنها پایداری، یادگیری و اعتماد است. چنین چشم‌اندازی نه تنها ضامن سلامت و کیفیت غذا خواهد بود، بلکه کل زنجیره ارزش غذایی جهانی را به سوی یک اکوسیستم سبز، ایمن و داده‌محور سوق خواهد داد [۲، ۸۴].

۹- نتیجه گیری

حسگرهای زیستی با تلفیق زیست‌فناوری، نانو فناوری و علوم داده، تحولی بنیادین در تضمین ایمنی و کیفیت مواد غذایی ایجاد کرده‌اند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از گیرنده‌های زیستی اختصاصی، امکان تشخیص سریع و دقیق آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی را در غلظت‌های بسیار پایین فراهم ساخته و گذار از روش‌های آزمایشگاهی سنتی به پایش بلادرنگ و غیرمخرب را ممکن کرده‌اند. کاربردهای متنوع این فناوری در تشخیص پاتوژن‌ها، کنترل

کیفیت مواد اولیه، پایش زنجیره تأمین و بسته‌بندی‌های هوشمند، ظرفیت بالای آن را در ارتقای شفافیت و کاهش ضایعات غذایی نشان می‌دهد. همگرایی حسگرهای زیستی با نانومواد پیشرفته، چاپ سه‌بعدی، ریزسامانه‌های میکروفلوئیدیک و هوش مصنوعی، نسل جدیدی از حسگرهای هوشمند با حساسیت و گزینش‌پذیری برتر پدید آورده است. با وجود این پیشرفت‌ها، تجاری‌سازی گسترده با چالش‌های جدی مواجه است: پایداری محدود گیرنده‌های زیستی در شرایط واقعی، دشواری کالیبراسیون در ماتریکس‌های پیچیده، هزینه تولید بالا، نبود استانداردهای بین‌المللی یکپارچه و الزامات مقرراتی سخت‌گیرانه. غلبه بر این موانع نیازمند تلاش هماهنگ پژوهشگران، صنعتگران و سیاست‌گذاران است. چشم‌انداز آینده به‌سوی طراحی سامانه‌های چندمنظوره، قابل‌حمل، زیست‌سازگار و متصل به شبکه‌های هوشمند ابری همگرا شده است. توسعه گیرنده‌های پایدار مبتنی بر مهندسی پروتئین، نانوکامپوزیت‌های چندکاره، ادغام با بلاک‌چین برای ردیابی شفاف، و الگوریتم‌های هوشمند پیش‌بینی ماندگاری، از مسیرهای پژوهشی اولویت‌دار هستند. تدوین پروتکل‌های استاندارد و مطالعات اعتبارسنجی صنعتی نیز برای تسریع تجاری‌سازی ضروری است. در نهایت، حسگرهای زیستی زیرساختی راهبردی برای صنعت غذایی هوشمند و پایدار در قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شوند. همگرایی این فناوری با انقلاب دیجیتال و اقتصاد چرخشی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش ضایعات، ارتقای سلامت عمومی و تحقق امنیت غذایی جهانی ایفا کند. سرمایه‌گذاری هدفمند در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای و تقویت پیوند دانشگاه-صنعت، کلید دستیابی به این چشم‌انداز است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این مطالعه در صورت درخواست معقول از نویسندگان
مسئول در دسترس خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در نگارش مقاله مشارکت داشته اند.

تضاد منافع

۱۰-منابع

- [1] Rashed, M.S., et al., Advances in cell-based biosensors: Transforming food flavor evaluation with novel approaches. Food Chemistry: X, 2025: p. 102336.
- [2] MP, D.R., et al., Next-Generation Biosensors for Real-Time Quality Monitoring in the Food Industry. Food Bioengineering, 2025. 4(4): p. 564–588.
- [3] Chen, Y., et al., Intelligent biosensors promise smarter solutions in food safety 4.0. Foods, 2024. 13(2): p. 235.
- [4] Sharifi Malvajerdi, S., et al., HVHC-ESD-induced oxygen vacancies: an insight into the phenomena of interfacial interactions of nanostructure oxygen vacancy sites with oxygen ion-containing organic compounds. ACS applied materials & interfaces, 2023. 15(41): p. 48785–48799.
- [5] Guan, Y., et al., Recent advances in microbial whole-cell biosensors for detecting food contaminants: a review. Food Control, 2025: p. 111674.
- [6] Shakouri, M., et al., Development of active and intelligent colorimetric biopolymer indicator: Anthocyanin-loaded gelatin-basil seed gum films. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023. 17(1): p. 472–484.
- [7] Nouri, M., et al., Investigating the stability of chemical and physical characteristics of non-fat set yoghurt containing textured milk during the storage time. 2013.
- [8] Farahmand, E., et al., Polymethacrylate coated electrospun chitosan/PEO nanofibers loaded with thyme essential oil: a newfound potential for antimicrobial food packaging. Journal of Food and Bioprocess Engineering, 2023. 6(2): p. 8–16.
- [9] Ekrami, M., et al., Food-based polymers for encapsulation and delivery of bioactive compounds. Biopolymers in Nutraceuticals and Functional Foods (RSC), 2022(16): p. 488–544.
- [10] Nath, S., Advancements in food quality monitoring: integrating biosensors for precision detection. Sustainable Food Technology. ۲۰۲۴, : (۴)۲p. 976–992.
- [11] Zomorodi, S., E. Azarpazhooh, and H. Behmadi, Comparison of the effect of linseed and basil seed mucilages with gum tragacanth and xanthan gum on textural and rheological properties of Iranian white cheese produced by ultrafiltration technique effect of some gums on properties of ultrafiltrated cheese. Journal of Food and Bioprocess Engineering, 2019. 2(1): p. 13–18.
- [12] Emam-Djomeh, Z., M. Ekrami, and A. Ekrami, Design and use of hydrogels for food component encapsulation. Materials Science and Engineering in Food Product Development, 2023: p. 211–226.
- [13] Boro, P.R., P.P. Borthakur, and E. Baruah, Advancements in optical biosensor technology for food safety and quality assurance. Engineering Proceedings, 2025. 106(1): p. 6.
- [14] Pandhi, S., et al., Emerging technologies in food safety: AI-powered, nano-enabled, and biosensor-based strategies for rapid contaminant detection. Food Analytical Methods, 2025. 18(9): p. 2010–2024.
- [15] Sobhan, A., K. Muthukumarappan, and L. Wei, Biosensors and biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: Challenges and opportunities. Food Packaging and Shelf Life, 2021. 30: p. 100745.
- [16] Santhanam, M., I. Algov, and L. Alfonta, DNA/RNA electrochemical biosensing devices a future replacement of PCR methods for a fast epidemic containment. Sensors, 2020. 20(16): p. 4648.
- [17] Mendoza, A.S.G., et al., Principles and challenges of whole cell microbial biosensors in the food industry. Journal of Food Science, 2024. 89(9): p. 5255–5269.
- [18] Bodkhe, G.A., et al., Biosensors in microbial ecology: Revolutionizing food safety and quality. Microorganisms, 2025. 13(7): p. 1706.
- [19] Li, J., et al., based biosensors based on multiple recognition modes for visual detection of microbially contaminated food. Journal of Future Foods, 2024. 4(1): p. 61–70.
- [20] Vallinayagam, S., et al., Multifunctional biosensor activities in food technology, microbes and toxins–A systematic mini review. Process Biochemistry, 2022. 120: p. 260–264.
- [21] Valente, B., et al. „Exploring Biosensors’ Scientific Production and Research Patterns: A Bibliometric Analysis. Sensors, 2024. 24(10): p. 3082.
- [22] Piccoli, M.B., et al., Immobilization of Horseradish Peroxidase onto

- Montmorillonite/Glucosamine–Chitosan Composite for Electrochemical Biosensing of Polyphenols. *Biosensors*, 2024. 14(6): p. 278.
- [23] Gashtasebi, S., et al., Bioactive Compounds as Modulators of Obesity: Molecular Mechanisms and Functional Implications. *Trends in Food Science & Technology*, 2026: p. 105806.
- [24] Liu, J., et al., Recent applications of rolling circle amplification in biosensors and DNA nanotechnology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023. 160: p. 116953.
- [25] Zhai, J. and S. Dong, Recent advances in microbial fuel cell-based toxicity biosensors: strategies for enhanced toxicity response. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2022. 34: p. 100975.
- [26] Bhatlawande, A.R., et al., Unlocking the future of smart food packaging: biosensors, IoT, and nano materials. *Food Science and Biotechnology*, 2024. 33 (Δ)p. 1075–1091.
- [27] Popescu, M. and C. Ungureanu, Biosensors in food and healthcare industries: bio-coatings based on biogenic nanoparticles and biopolymers. *Coatings*, 2023. 13(3): p. 486.
- [28] Meliana, C., et al., Biosensor in smart food traceability system for food safety and security. *Bioengineered*, 2024. 15(1): p. 2310908.
- [29] Wang, X., et al., Biosensor for agriculture and food safety: Recent advances and future perspectives. *Advanced Agrochem*, 2022. 1(1): p. 3–6.
- [30] Yao, B., et al., Rapid Advances of Versatile MXenes for Electrochemical Enzyme-Based Biosensors, Immunosensors, and Nucleic Acid-Based Biosensors. *ChemElectroChem*, 2022. 9(11): p. e202200103.
- [31] Baranwal, J., et al., Electrochemical sensors and their applications: A review. *Chemosensors*, 2022. 10(9): p. 363.
- [32] Nguyen, T.T.-Q., E.R. Kim, and M.B. Gu, A new cognate aptamer pair-based sandwich-type electrochemical biosensor for sensitive detection of *Staphylococcus aureus*. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022. 198: p. 113835.
- [33] Jamwal, V. and A. Mittal, Recent progresses in nanocomposite films for food-packaging applications: synthesis strategies, technological advancements, potential risks and challenges. *Food Reviews International*, 2024. 40(10): p. 3634–3665.
- [34] Pabaati, R., et al., Advancements in food packaging strategies with a focus on antimicrobials and sensor technologies: a comprehensive review. *Sustainable Food Technology*, 2025.
- [35] Sobhan, A., et al., IoT-enabled biosensors in food packaging: A breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. *Foods*, 2025. 14(8): p. 1403.
- [36] Scognamiglio, V., et al., Biosensing technology for sustainable food safety. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2014. 62: p. 1–10.
- [37] Sadeghipour, M., et al., The effect of methyl cellulose based active edible coatings on the storage life of tomato. 2012.
- [38] Pourjavid, H., et al., Improvement of the quality parameters of a novel synbiotic yogurt sauce using microencapsulated *Lactobacillus paracasei* and natural prebiotics. *Food Science and Technology*, 2022. 42: p. e40322.
- [39] Emam-Djomeh, Z., et al., Overview of Types of Materials Used for Food Component Encapsulation. *Materials Science and Engineering in Food Product Development*, 2023. 1: p. 73–92.
- [40] Patra, F. and R.K. Duary, Biosensors involved in dairy industries, in *Biosensors in food safety and quality*. 2022, CRC Press. p. 135–158.
- [41] Fredj, Z., et al., Enzymatic electrochemical biosensors for neurotransmitters detection: recent achievements and trends. *Chemosensors*, 2023. 11 (Y)p. 388.
- [42] Sun, G., et al., Immobilization of enzyme electrochemical biosensors and their application to food bioprocess monitoring. *Biosensors*, 2023. 13(9): p. 886.
- [43] Nastasijevic, I., et al., Recent advances in biosensor technologies for meat production chain. *Foods*, 2025. 14(5): p. 744.
- [44] Xiong, X., et al., Rapid freshness and survival monitoring biosensors of fish: Progress, challenge, and future perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 2022. 129: p. 61–73.
- [45] Ekrami, M., et al., Nanotechnology-based formulation for alternative medicines and natural products: an introduction with clinical studies. *Biopolymers in Nutraceuticals and Functional Foods (RSC)*, 2022(17): p. 545–580.
- [46] Roshani-Dehlaghi, N. and A. Ekrami, Advances and Applications of Electrospun Nanostructure-Based Encapsulation of Natural Compounds. *Food Engineering Research*, 2026. 25(1): p. 41–62.
- [47] Yeniterzi, D., et al., Smart NFC-enabled point-of-care biosensor utilizing liquid metal Bi–Sn/Au nanostructures for cardiac troponin T detection. *Chemical Engineering Journal*, 2026: p. 172751.
- [48] Ekrami, M., et al., pH-responsive color indicator of saffron (*Crocus sativus* L.) anthocyanin-activated salep mucilage edible film for real-time monitoring of fish fillet freshness. *Chemistry*, 2022. 4(4): p. 1360–1381.
- [49] Kishore, A., et al., Innovative packaging strategies for freshness and safety of food

- products: A review. *Packaging Technology and Science*, 2024. 37(5): p. 399–427.
- [50] Cho, S.-K., B. Igliński, and G. Kumar, Biomass based biochar production approaches and its applications in wastewater treatment, machine learning and microbial sensors. *Bioresource technology*, 2024. 391: p. 129904.
- [51] Kumar, H., et al., Immunosensors in food, health, environment, and agriculture a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2024. 22(5): p. 2573–2605.
- [52] Fortunati, S., S. Nazir, and M. Giannetto, Recent Advances in Nucleic Acid-Based Electrochemical Sensors for the Detection of Food Allergens. *Sensors*, 2026. 26(1): p. 263.
- [53] Das, D., et al., Aptamer-based sensing in food science: precision tools for enhanced consumer safety and perception. *Current Opinion in Food Science*, 2025. 66: p. 101363.
- [54] Wei, X., et al., Recent advances in electrochemical cell-based biosensors for food analysis: Strategies for sensor construction. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024. 248: p. 115947.
- [55] Pradas-González, F., et al., Biosensing strategies using recombinant luminescent proteins and their use for food and environmental analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2024. 416(30): p. 7205–7224.
- [56] Muthu, A., et al., Nanomaterials for smart and sustainable food packaging: Nano-Sensing mechanisms, and regulatory perspectives. *Foods*, 2025. 14(15): p. 2657.
- [57] D'Almeida, A.P. and T.L. de Albuquerque, Innovations in food packaging: from bio-based materials to smart packaging systems. *Processes*, 2024. 12(10): p. 2085.
- [58] Ekrami, M., et al., Next-Generation Smart and Safe Foods: Artificial Intelligence-Driven Strategies for 4D Food Pre-Printing Challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 2025: p. 1–18.
- [59] Jangid, H., et al., Nanoparticle-based detection of foodborne pathogens: Addressing matrix challenges, advances, and future perspectives in food safety. *Food Chemistry: X*, 2025: p. 10.2696.
- [60] Qiao, X., et al., Recent advances in nanomaterial-based sensing for food safety analysis. *Processes*, 2022. 10(12): p. 2576.
- [61] Park, S.-H. and Y. You, Gold nanoparticle-based colorimetric biosensing for foodborne pathogen detection. *Foods*, 2023. 12(1): p. 95.
- [62] Gao, J., et al., Graphene-based sensors for the detection of microorganisms in food: a review. *Biosensors*, 2023. 13(6): p. 579.
- [63] Sharma, A., et al., Nanoparticles based nanosensors: Principles and their applications in active packaging for food quality and safety detection. *Biochemical Engineering Journal*, 2023. 193: p. 108861.
- [64] Zheng, L., et al., Nanomaterial-based biosensors for the detection of foodborne bacteria: a review. *Analyst*, 2023. 148(23): p. 5790–5804.
- [65] Banicod, R.J.S., et al., Integration of Artificial Intelligence in Biosensors for Enhanced Detection of Foodborne Pathogens. *Biosensors*, 2025. 15(10): p. 690.
- [66] Akkaş, T., et al., The Role of Artificial Intelligence in Advancing Biosensor Technology: Past, Present, and Future Perspectives. *Advanced Materials*, 2025: p. 2504796.
- [67] Ekrami, M., et al., Anti-Biofilm Efficacy of a Salep Mucilage-Based Pad Containing Nanoethosomal Allium Jesdianum Essential Oil Boiss. for Controlling Healthcare-Associated Infections. *BioNanoScience*, 2025. 15(4): p. 1–23.
- [68] Agron, D.J.S. and W.S. Kim, 3D printing technology: role in safeguarding food security. *Analytical chemistry*, 2024. 96(11): p. 4333–4342.
- [69] Silva, L.R.G., et al., Electrochemical Biosensors 3D Printed by Fused Deposition Modeling: Actualities, Trends, and Challenges. *Biosensors*, 2025. 15(1): p. 57.
- [70] Zhang, J., et al., Microfluidic biosensors for rapid detection of foodborne pathogenic bacteria: recent advances and future perspectives. *Frontiers in chemistry*, 2023. 11: p. 1536928.
- [71] Mobahi, N., et al., FAI-Integrated Bio-Nanocomposite Food Packaging: Sustainable, Functional, and Intelligent Solutions. *Trends in Food Science & Technology*, 2025: p. 105–136.
- [72] Zolti, O., B. Suganthan, and R.P. Ramasamy, Lab-on-a-chip electrochemical biosensors for foodborne pathogen detection: A review of common standards and recent progress. *Biosensors*, 2023. 13(2): p. 215.
- [73] Emam-Djomeh, Z., et al., Role of Nanotechnology in Food Industries. *Nanotechnology in the Food Industry*, 2024: p. 93–110.
- [74] Versino, F., et al., Sustainable and bio-based food packaging: A review on past and current design innovations. *Foods*, 2023. 12(5): p. 1057.
- [75] Singh, P., et al., A systematic review on recent trends and perspectives of biosensors in food industries. *Journal of Food Safety*, 2023. 43(5): p. e13071.
- [76] Wang, K., et al., Review of electrochemical biosensors for food safety detection. *Biosensors*, 2022. 12(11): p. 959.

- [77] Chen, Q., et al., Emerging biosensors to detect aflatoxin M₁ in milk and dairy products. *Food Chemistry*, 2023. 398: p. 133848.
- [78] Cossettini, A., et al., Rapid detection of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Campylobacter* spp., and *Escherichia coli* in food using biosensors. *Food Control*, 2022. 137: p. 108962.
- [79] Lzaod, S. and T. Dutta, Recent advances in the development of oxidoreductase-based biosensors for detection of phenolic antioxidants in food and beverages. *ACS omega*, 2022. 7(51): p. 47434–47448.
- [80] Youssef, K., et al., Recent advances in biosensors for real time monitoring of pH, temperature, and oxygen in chronic wounds. *Materials Today Bio*, 2023. 22: p. 100764.
- [81] Pastore, A., et al., Real-time monitoring of the pH of white wine and beer with colorimetric sensor arrays (CSAs). *Food Chemistry*, 2024. ۴۵۲: p. 139513.
- [82] Sun, B., et al., Nanomaterial-Based Biosensors for Aflatoxin B₁ Detection: Current Advances, Challenges, and Prospects. *Small*, 2025. 21(36): p. e03718.
- [83] Li, Q., et al., Decoding wheat contamination through self-assembled whole-cell biosensor combined with linear and non-linear machine learning algorithms. *Biosensors and Bioelectronics*, 2025. 267: p. 116869.
- [84] Jiang, W., et al., Advancements in Intelligent Sensing Technologies for Food Safety Detection. *Research*, 2025. 8: p. 0713.
- [85] Sarza, R.M., et al., Nanoparticle-based biosensors for virus detection in food systems: from farm to fork. *Nanoscale*, 2025. 17(31): p. 17993–18015.
- [86] Wasilewski, T., W. Kamysz, and J. Gębicki, AI-assisted detection of biomarkers by sensors and biosensors for early diagnosis and monitoring. *Biosensors*, 2024. 14(7): p. 356.



Scientific Research

Biosensors: The New Frontier of Next-Generation Food IndustryHoma Behmadi^{1*}, Negar Roshani-Dehlaghi², Ali Ekrami³

1–Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension

Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2–Department of Food Science and Industry, Ares International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

3–Department of Nursing, University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**ABSTRACT****Article History:**

Received: 2026/05/13

Review: 2026/06/19

Accepted: 2026/06/22

Keywords:

Biosensors;

Food safety;

Nanotechnology;

Smart packaging;

Real-time monitoring

DOI: 10.48311/fsct.2026.120406.83144

*Corresponding Author E-

h.behmadi@areeo.ac.ir

Biosensors represent one of the most innovative technologies developed in recent decades in the field of the food industry. By integrating biotechnology, materials engineering, and data science, these systems enable accurate, rapid, and cost-effective monitoring of food quality and safety. Biosensors are designed based on sensitive biological elements such as enzymes, antibodies, or DNA, allowing them to detect chemical compounds, pathogens, and contaminants at very low concentrations.

The present study reviews the theoretical foundations, historical development, and technological advancements of biosensors in the food sector, and analyzes their applications in areas such as microbial contamination detection, raw material quality control, supply chain monitoring, and the development of smart packaging systems. Advances in nanotechnology, micro-systems, artificial intelligence, and the Internet of Things (IoT) have significantly enhanced the sensitivity of biosensors and enabled their integration into intelligent monitoring networks.

Despite advantages such as high accuracy, low cost, and real-time performance, several challenges remain, including biological stability, commercialization, and industrial standardization. The future of this technology lies in its integration with digital systems, biocompatible materials, and sustainable production processes. Such an approach can accelerate the transition toward a smart, transparent, and safe food industry, contributing significantly to the achievement of global food security.