



بررسی روش‌های نوین فرآوری و نگهداری مواد غذایی: از فناوری‌های غیرحرارتی تا بسته‌بندی هوشمند

امیر صوفی نیا^۱

^۱. استاد دانشگاه فرهنگیان (مسئول) amirsoufinia26@gmail.com

خلاصه

پیشرفت تکنولوژی در حوزه صنایع غذایی، راهکارهای نوین و موثری برای افزایش ایمنی، سلامت و ماندگاری مواد غذایی فراهم آورده است. فناوری‌های غیرحرارتی (پلازما سرد، فشار هیدرواستاتیک بالا، میدان پالس الکتریکی، پرتودهی، فراصوت)، نانوفناوری و بسته‌بندی هوشمند، نه تنها موجب ارتقاء کیفیت و حفظ ارزش تغذیه‌ای، بلکه به کاهش ضایعات و حذف یا کاهش مواد نگهدارنده شیمیایی نیز کمک کرده‌اند. این روش‌ها ضمن ایجاد فرصت‌های گسترده برای صنایع غذایی، با چالش‌هایی همچون هزینه بالا و عدم آگاهی کافی جامعه و صنعت روبرو هستند. این مقاله با رویکرد مروری و تحلیلی، به بررسی تازه‌ترین دستاوردهای فناوری‌های نوین فرآوری و نگهداری مواد غذایی، کاربردها و محدودیت‌ها، مطالعات موردی ایران و جهان و راهکارهای توسعه این فناوری‌ها در کشور می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها

فناوری غیرحرارتی، بسته‌بندی هوشمند، نانوفناوری، ایمنی مواد غذایی، ماندگاری، نوآوری غذایی

فصل اول: مقدمه تحلیلی و جایگاه جهانی و ملی فناوری‌های نوین فرآوری و نگهداری مواد غذایی

اهمیت موضوع

حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی به علت نقش اساسی آن در سلامت عمومی، ساختار اقتصادی و امنیت غذایی کشورها، همواره دغدغه‌ای جهانی به شمار رفته است [۱]. روند رشد سریع جمعیت جهان، تغییر سبک زندگی، افزایش گرایش به غذاهای فرآوری‌شده و محدودیت منابع طبیعی، منجر به افزایش تقاضا برای راهکارهایی شده که مواد غذایی را با ایمنی بیشتر، ارزش تغذیه‌ای بالاتر و ماندگاری طولانی‌تر عرضه کنند [۲]. بر اساس گزارش فائو (FAO)، در سال ۲۰۲۱ نزدیک به یک سوم محصولات کشاورزی و غذایی جهان به دلیل فساد، آلودگی یا فرآوری نامناسب، از بین می‌رود [۱].

محدودیت‌های روش‌های سنتی

روش‌های سنتی همچون حرارت‌دهی، خشک‌کردن، نمک‌سود کردن و کنسروسازی اگر چه تاثیر بسزایی در افزایش عمر مفید مواد غذایی داشته‌اند، اما دارای معایبی از جمله افت کیفیت حسی، کاهش مواد مغذی، تغییر یا تخریب ساختار



پروتئین‌ها و ویتامین‌ها و حتی ایجاد ترکیبات ناخواسته مانند آکریل آمید در برخی فرآورده‌ها هستند [۲][۳]. برای مثال، مطالعات نشان داده‌اند که تیمار حرارتی در دمای بالا، منجر به کاهش محتوی ویتامین C تا بیش از ۵۰٪ در برخی میوه‌ها و سبزی‌ها و کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌گردد [۲].

زمینه‌های ظهور فناوری‌های نوین

برای رفع این محدودیت‌ها و بهبود ایمنی، کیفیت و سلامت مواد غذایی، نیاز به توسعه و بکارگیری فناوری‌های نوین فرآوری و نگهداری بیش از پیش احساس می‌شود [۴]. فناوری‌های غیرحرارتی مانند پلاسما سرد، میدان‌های پالس الکتریکی (PEF)، فشار هیدرواستاتیک بالا (HPP)، پرتودهی (Irradiation) و فراصوت (Ultrasound) با هدف تخریب میکروارگانیسم‌ها، افزایش عمر ماندگاری و حفظ بهتر ترکیبات مفید بدون آسیب مکانیکی یا حرارتی به بافت، توسعه یافته‌اند [۴][۳]. افزون بر این، بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند و استفاده از نانومواد هم به حفظ کیفیت و تشخیص سریع فساد کمک کرده‌اند [۵][۶].

داده‌های مقایسه‌ای و نمونه‌های جهانی

مطالعات انجام‌شده در کشورهای توسعه‌یافته نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های غیرحرارتی تا ۲۰٪ کاهش اتلاف مواد غذایی و ۱۵ تا ۳۰٪ افزایش کیفیت و سلامتی محصولات را رقم زده است [۴][۵]. برای نمونه، در صنعت آبمیوه، استفاده از فشار بالا جایگزین پاستوریزاسیون حرارتی شده و منجر به حفظ بهتر طعم، رنگ و ویتامین‌های حساس به حرارت شده است [۲]. در مقابل، در کشورهایی مثل ایران، استفاده از این فناوری‌ها هنوز گسترده نشده است و بیش از ۷۰٪ کارخانه‌های صنایع غذایی به روش‌های کلاسیک متکی هستند [۷].

جایگاه ایران و چالش‌ها

در ایران، تحقیق و توسعه در زمینه فناوری‌های نوین به ویژه در دانشگاه‌ها و برخی واحدهای صنعتی پیشرو آغاز شده است اما اجرای فراگیر صنعتی هنوز محدود است [۷]. موانعی مانند هزینه بالای واردات تجهیزات، فقدان زیرساخت فنی، نبود حمایت مالی و فاصله دانش فنی بین دانشگاه و صنعت از جمله عوامل کندی این رشد است [۷]. طبق ارزیابی‌های مرکز پژوهش‌های مجلس، صنایع غذایی ایران برای ارتقاء کیفی محصولات، حفظ بازارهای صادراتی و کاهش ضایعات غذایی نیازمند گذار از روش‌های سنتی به فناوری‌های نوین هستند.

بسته‌بندی هوشمند و نقش نانوفناوری

بسته‌بندی هوشمند و فعال از جدیدترین دستاوردهای حوزه نگهداری غذا محسوب می‌شود که علاوه بر حفظ امنیت فیزیکی، قادر به ثبت تغییرات کیفیت غذا، تشخیص فساد و حتی آزادسازی تدریجی ترکیبات نگهدارنده یا آنتی‌میکروبیال در محصول هستند [۵][۶]. نانومواد مانند نقره نانو، نانورس و... در بسته‌بندی یا حذف آلاینده‌ها نقش بسزایی داشته و موجب افزایش طول عمر مواد غذایی، شناسایی زود هنگام فساد و کاهش مصرف مواد شیمیایی شده‌اند [۶]. به عنوان



مثال، استفاده پژوهشی از نانوکامپوزیت‌ها در پلیمرهای بسته‌بندی، باعث کاهش نفوذ اکسیژن تا ۴۰٪ و افزایش عمر مفید محصول به‌ویژه در صنعت گوشت و محصولات لبنی شده است [۶].

آینده پژوهی و چشم‌انداز توسعه

انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ بیش از ۵۰٪ خطوط تولید صنایع غذایی کشورهای توسعه‌یافته، به فناوری‌های غیرحرارتی و بسته‌بندی هوشمند تجهیز شوند [۳][۴]. در ایران نیز با توجه به پتانسیل دانش فنی، سرمایه انسانی و اولویت‌های سیاستی در حوزه امنیت غذایی و صادرات، توسعه این فناوری‌ها ضروری و فرصت‌ساز ارزیابی می‌شود [۷].

هدف مقاله و ساختار پیش‌رو

مقاله پیش‌رو به بررسی علمی و تحلیلی فناوری‌های غیرحرارتی، بسته‌بندی هوشمند و فعال و کاربردهای نانوفناوری در صنایع غذایی خواهد پرداخت. ضمن تحلیل مزایا و مخاطرات، تجارب کشورهای با شرایط ساختاری مشابه ایران و راهکارهای اجرایی برای بومی‌سازی این فناوری‌ها در حوزه‌ی فرآوری و نگهداری مواد غذایی کشور ارائه می‌شود.

فصل دوم

۲-۱. مقدمه: ضرورت بازخوانی فن‌آوری‌های کلاسیک و مسیر گذار

تاریخچه فرآوری و نگهداری غذا با سیر تکامل تمدن بشری عجین شده است، به طوری که هویت فرهنگی، امنیت غذایی و حتی ترکیب رژیم غذایی انسان‌ها در گرو پیشرفت همین فناوری‌ها بوده است [۸]. روش‌هایی مانند حرارت‌دهی، خشک‌کردن، نمک‌سود کردن، تخمیر و سردسازی باعث شکل‌گیری زنجیره تامین غذایی پایدار در جوامع سنتی و مدرن شده‌اند. هرچند رسالت اصلی این فنون، مقابله با فساد، افزایش امنیت غذایی، و حفظ دسترسی پایدار به مواد غذایی بوده است، اما با توسعه فناوری‌های نوین و تغییر انتظارات جامعه، نگرش صرف به امنیت به سود نگاه "سلامت‌محور" و "کیفیت‌محور" دگرگون شده است [۸][۱۳].

امروزه حفظ ارزش تغذیه‌ای، کیفیت حسی، کنترل ضایعات و کاهش ریسک ترکیبات مضر، رویکردهای غالبی هستند که باید به موازات افزایش ماندگاری تحقق یابند. نیاز روزافزون به صادرات محصولات غذایی و سخت‌گیری بازارهای جهانی، اهمیت بروزرسانی فناوری‌های سنتی را دوچندان کرده است [۱۵]. این فصل بر مبنای شواهد جهانی و داخلی، نقد آینده‌نگر و علمی بر نقاط قوت/ضعف روش‌های کلاسیک و زمینه‌های ظهور فناوری‌های مدرن در ایران و جهان ارائه می‌کند.

۲-۲. حرارت‌دهی (Sterilization) & Pasterization): ستون بقای غذایی یا عامل افت کیفیت؟

۲-۲-۱. انواع، کاربردها و نقش تاریخی



حرارت‌دهی به عنوان نخستین سد دفاعی بشر در برابر فساد غذایی از هزاره‌ها پیش نقش‌آفرینی کرده است؛ بسته به نوع محصول، دمای فرآوری و مدت آن، شیوه‌های متنوعی چون پاستوریزاسیون (حرارت‌دهی ملایم)، استریلیزاسیون (حرارت‌دهی شدید)، بلاشینگ و حتی (UHT حرارت بالای لحظه‌ای) رایج بوده [۸].

این روش‌ها، نه تنها در کاهش بار میکروبی بلکه در مهار آنزیم‌های عامل فساد، موثر بوده‌اند و موجب ساختاردهی به زنجیره صنایع بزرگ غذایی همچون کنسروسازی، لبنیات، آبمیوه، رب گوجه‌فرنگی و فرآورده‌های گوشتی شده‌اند [۹].

در کشورهای توسعه یافته، همواره بهبود پروفایل حسی محصولات حرارتی یک اولویت پژوهشی و صنعتی بوده است. برای مثال، شیر UHT در اروپا به‌رغم ماندگاری بالا، به‌خاطر تغییر مزه و قهوه‌ای‌شدن، مقبولیت کمتری نسبت به شیر پاستوریزه دارد [۱۰].

۲-۲-۲. آسیب‌شناسی و پیامدهای زیستی

با وجود نقش کلیدی، حرارت‌دهی منجر به تخریب ویتامین‌های حساس (C, B1, B9)، افت فعالیت آنتی‌اکسیدانی و از بین رفتن ترکیبات موثر حسی نظیر استرها (در آبمیوه و شیر) می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در فرآوری حرارتی آب پرتقال، تا ۷۵٪ ویتامین C و ۴۰٪ فلاونوئیدها طی ۱۵ دقیقه حرارت‌دهی کاهش می‌یابد [۹، ۱۳].

در فرآورده‌های گوشتی، تشدید تشکیل آمین‌های هتروسیکلیک (HAA) و آکریل‌آمید در پی دماهای بالا و زمان زیاد، مستقیماً ریسک سرطان معده و روده را افزایش داده است. گزارش سازمان بهداشت جهانی و برخی مراکز تحقیقاتی در اروپا این نگرانی‌ها را بارها مطرح کرده‌اند [۱۲].

۲-۲-۳. نمونه‌های کلینیکی و مقایسه بین‌المللی

در ایران و کشورهای منطقه شرق مدیترانه، شیوه‌های حرارتی سنتی و نیمه‌صنعتی همچنان غالب هستند، به طوری که ۹۲٪ فرآورده‌های کنسروی و لبنی به این شیوه آماده می‌شوند [۱۵]. این سهم، در ژاپن تنها ۴۵٪ گزارش شده و در اتحادیه اروپا نیز بین ۵۸-۶۴٪ متغیر است؛ بخش عمده کاهش سهم، ناشی از رشد روش‌های غیرحرارتی و ترکیبی است [۱۴].

از نظر افت کیفیت، در ایران ضایعات ناشی از افت کیفیت حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات حرارت دیده، سالانه حدود ۷۰۰ میلیارد تومان برآورد می‌شود [۱۵].

۲-۳. خشک‌کردن (Dehydration/Drying): ارزان اما گاه خطرناک!

۲-۳-۱. تحلیل مزایا و محدودیت‌ها



خشک کردن با هدف افزایش عمر ماندگاری و کاهش حجم حمل و نقل، یکی از اقتصادی ترین روش‌هاست. پژوهش‌های جهانی نشان داده‌اند که خشک کردن حرارتی باعث کاهش فعالیت آبی (aw)، مهار قارچ و باکتری و تولید محصولاتی چون کشک، چیپس میوه، سبزی خشک و ماهی خشک شده است [۱۰].

ولی مهم ترین آسیب خشک کردن (خصوصاً به شیوه حرارتی یا آفتابی) افت شدید مواد زیست فعال (پلی فنول‌ها، ویتامین‌های محلول در آب، آنزیم‌های مفید)، تیره شدن رنگ (واکنش میلارد) و حتی تولید مواد سمی (مانند آفلاتوکسین) در صورت رشد کپک پس از فرآیند است [۱۰]، [۱۱].

۲-۳-۲. داده‌های آماری و مقایسه تطبیقی

آمار فائو نشان می‌دهد ضایعات خشکبار و میوه خشک در آسیا عمدتاً ناشی از کیفیت پایین فرآوری، ضعف زیرساخت مراقبت پس از تولید و استفاده از روش‌های غیربهداشتی است [۱۳]. در ایران، تقریباً ۶۵٪ ضایعات پسته، ۳۵٪ زعفران و نزدیک ۴۰٪ برگ سیر خشک مربوط به فرآیند خشک کردن و نگهداری سنتی است [۱۵].

در فرانسه و آمریکا، گسترش استفاده از خشک کن‌های انجمادی و خلا موجب حفظ ۶۰-۷۵٪ بیشتر از ترکیبات زیست فعال نسبت به روش‌های سنتی شده است [۱۳].

۲-۳-۳. تجربه صنایع و نقد راهبرد ایران

در حالی که صادرات خشکبار و میوه خشک به اروپا و روسیه برای ایران اهمیت حیاتی دارد، ضعف فناوری و نظارت بهداشتی منجر به برگشت خوردن محموله‌های صادراتی طی پنج سال اخیر به میزان قابل توجهی شده و عملاً برند کشاورزی ایران را تهدید می‌کند [۱۵].

۲-۴. نگهداری با افزودنی‌ها: مزایا، ریسک‌ها و استانداردها

۲-۴-۱. تحلیل علمی افزودنی‌ها

افزودنی‌هایی مانند نمک، شکر، اسیدهای خوراکی و ترکیبات شیمیایی (نیتريت، بنزوات، سولفیت) قابلیت مهار رشد میکروارگانیسم‌ها و افزایش عمر مفید را فراهم می‌سازند [۱۲]. مزایایی مانند سهولت کاربرد، مقرون به صرفه بودن، و امکان تولید انبوه برای محصولات گوشتی، فرآورده‌های لبنی، شیرینی‌ها و نوشیدنی‌ها مشهود است [۸]، [۱۲].

۲-۴-۲. پیامدهای سلامت عمومی و محدودیت‌ها

با وجود نقش پیشگیرانه، مصرف کنترل نشده افزودنی‌ها ممکن است منجر به مشکلات قلبی عروقی، اختلالات تیروئیدی، آلرژی و حتی سرطان گردد. برای مثال، افزایش مصرف نیتريت و نیترات در سوسیس و کالباس ایرانی با تحریک تولید نیتروزامین‌ها (سرطان‌زا) همراه بوده و انسیتوی ملی تحقیقات تغذیه نسبت به آن هشدار داده است



[۱۲]. سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) بارها روی تعیین سقف مجاز افزودنی‌ها تاکید داشته و در اتحادیه اروپا نیز سخت‌گیرانه‌ترین استانداردها اعمال می‌شود [۱۳].

۳-۴-۲. تجربه ایران

مطالعات برآورد می‌کند بیش از ۷۰٪ واحدهای فراوری پروتئین و ۵۵٪ صنایع لبنی ایران، به خاطر محدودیت هزینه و ضعف دانش فنی، استانداردهای مکمل افزودنی‌ها را رعایت نمی‌کنند [۱۵]. سیاست‌های نظارتی و آموزش نیروی انسانی حیاتی است.

۵-۲. تخمیر: پلی میان سنت و فناوری

۱-۵-۲. کارکردهای تغذیه‌ای و بهداشتی

تخمیر در تولید فرآورده‌هایی چون ماست، پنیر، نان، دوغ، کفیر، ترشی و حتی سویا یک فناوری کلیدی است که با ارتقاء کیفیت تغذیه‌ای، بهبود هضم و افزایش قابلیت زیستی مواد مغذی، نقش روشنی در سلامت و امنیت غذایی دارد [۱۱].

مطالعات Steinkraus نشان می‌دهد تخمیر کنترل‌شده باعث رشد میکروب‌های پروبیوتیکی مفید، کاهش آنتی‌ژن‌ها و تجزیه سموم طبیعی در محصولات کشاورزی می‌شود [۱۱].

۲-۵-۲. محدودیت‌های صنعتی‌سازی و تجربه ایران

به‌رغم مزیت‌ها، استانداردسازی تخمیر (در میزان سدیم، pH، کیفیت میکروب استارتر)، کنترل کیفیت مداوم و نظارت بهداشتی در ایران ضعیف است. محصولات لبنی سنتی متأسفانه با ریسک آلودگی و نواسان شدید ویژگی‌های حسی و بهداشتی مواجه‌اند و الزامات به‌روز کنترل کیفیت کمتر رعایت می‌شود [۱۵].

۳-۵-۲. تفاوت‌های جهانی

در اتحادیه اروپا و ژاپن، با صنعتی‌سازی کامل این فرآیند و استفاده از استارتر اختصاصی، امکان کاهش ضایعات و افزایش صادرات فراهم شده است. هم‌اکنون مکمل‌های پروبیوتیکی و نان‌های تخمیری ویژه در بازار جهانی صادر و مورد استقبال گسترده قرار گرفته‌اند [۱۴]. ایران برای رقابت نیازمند توسعه زیرساخت استارترها و خطوط صنعتی ویژه است [۱۵].

۶-۲. نگهداری با سرما و انجماد: مزایا، چالش‌ها و آینده

۱-۶-۲. مزایای سرما و انجماد



این فناوری با کاهش دمای محیط، سرعت فعالیت میکروبی و آنزیمی را کاهش می‌دهد و امکان ذخیره‌سازی و صادرات انبوه میوه، سبزی، گوشت، ماهی و حتی لبنیات را فراهم می‌کند [۸].

انجماد سریع (IQF) در کشورهای اسکندیناوی، آمریکا و استرالیا منجر به عرضه میوه و سبزی کاملاً تازه با حداقل افت ارزش تغذیه‌ای شده است [۱۳].

۲-۶-۲. پیامدهای زیستی و محدودیت‌ها

بزرگ‌ترین چالش انجماد، تشکیل کریستال‌های یخ در ساختار گیاهی است که بافت و مزه محصول را تغییر می‌دهد. همچنین برخی باکتری‌های سرمادوست (مانند لیستریا مونوسیتوژنز) قادرند در دماهای پایین رشد کنند [۸], [۱۲].

در ایران، چالش نوسان برق، هزینه انرژی و کمبود فناوری IQF منجر به افزایش ضایعات محصولات صادراتی و کاهش رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی شده است [۱۵].

۲-۶-۳. نیاز به بروزرسانی زیرساخت‌ها

بر اساس گزارش پژوهش‌های مجلس، تا سال ۱۴۰۰ تنها ۲۵٪ صنایع غذایی ایران دارای زنجیره کامل سرد (از محل تولید تا مصرف) بوده‌اند؛ این عدم پوشش، سالانه موجب از بین رفتن ۳۵۰ هزار تن میوه و سبزی با کیفیت صادراتی می‌شود [۱۵].

۲-۲. زمینه‌سازی ظهور فناوری‌های نوین: نقد سیاستی و افق آینده

۲-۷-۱. نارضایتی مصرف‌کننده و تکانه‌های دانش‌بنیان

تحقیقات نشان می‌دهد با آگاهی بیشتر جامعه نسبت به مضرات نگهداری سنتی، تقاضا برای استفاده از تکنیک‌های غیرحرارتی و ترکیبی رشد یافته است [۱۳]. پارادایم جهانی به سوی فناوری‌های کم‌مصرف، با ماندگاری بالا، حداقل افت ارزش و قابلیت ردیابی است [۱۴].

۲-۷-۲. شدت رقابت صادراتی و ضرورت تغییر راهبرد

در اتحادیه اروپا ۳۶٪ کارخانه‌ها به فناوری‌های نوین (پالسی، فشار بالا، فراصوت، بسته‌بندی هوشمند، کنترل اتمسفر) مجهز هستند، این رقم در ایران زیر ۱۰٪ است [۱۴], [۱۵]. فاصله فناوری بالاخص در صنایع گوشت و آبمیوه‌ها مشهود است و محدودیت صادرات ناشی از نبود فناوری‌های روز بارها توسط تحلیل‌های وزارت صمت و سازمان توسعه تجارت منعکس شده است [۱۵].

۲-۷-۳. نقاط آسیب‌شناختی ایران و پیشنهادات راهبردی



عدم سرمایه‌گذاری کافی، ضعف آموزش، کمبود قوانین پشتیبان از نوآوری، نبود شبکه حمایت دولتی و ارتباط ضعیف میان صنعت و دانشگاه؛ مهم‌ترین موانع ارتقاء فناوری فرآوری مواد غذایی در ایران هستند [۱۳]، [۱۵].

۸-۲. جمع‌بندی تطبیقی، سیاست‌گذاری و راهبرد آینده

رویکرد تقویت‌شده جهانی به سمت ترکیبی‌سازی فناوری‌های کلاسیک و نوین ((Hybridization، سفارشی‌سازی فناوری متناسب با محصول، افزایش سرمایه‌گذاری تحقیق و آموزش نیروی انسانی، بهره‌مندی از مدل‌های موفق اتحادیه اروپا، هند و چین و اصلاح سیاست‌های حمایتی، رموز دستیابی به امنیت غذایی پایدار در دهه پیش‌رو هستند [۱۴]، [۱۵].

برای ایران، بازآموزی مهندسان غذا، بروزرسانی زیرساخت‌ها، یکپارچگی دانشگاه-صنعت و حضور فعال در زنجیره صادرات، راهبرد برون‌رفت از چرخه ضایعات و افت کیفیت خواهد بود.

فصل سوم: فناوری‌های نوین غیرحرارتی در فرآوری و نگهداری مواد غذایی؛ اصول، کاربردها، چالش‌ها و وضعیت ایران

۱-۳. مقدمه: پارادایم نوین در حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی

رشد جمعیت جهانی، تغییر الگوهای مصرف، افزایش نگرانی‌های بهداشتی، تغییر سیاست‌های واردات و صادرات غذایی، و تاکید بر سلامت و امنیت غذایی، صنعت غذا را به گذار از فناوری‌های سنتی به فناوری‌های دانش‌بنیان و پایدار سوق داده است [۱۶]. گرچه فناوری‌های حرارتی، نقش شایسته‌ای در تامین غذای سالم طی سده‌های گذشته ایفا کرده‌اند، اما کاهش آشکار کیفیت تغذیه‌ای، تغییرات نامطلوب حسی، تشکیل ترکیبات مضر نظیر آکریلامید و زیان به مواد زیست‌فعال، نیاز به اصلاح رویکرد سنتی را برجسته کرده است.

در این منظومه، فناوری‌های غیرحرارتی نه یک روند زودگذر، بلکه یک انتخاب استراتژیک و آینده‌مدار برای کل زنجیره غذایی هستند. پژوهش‌های دو دهه اخیر نشان داده‌اند که اکثر ترکیبات زیست‌فعال (ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، پلی‌فنول‌ها)، ترکیبات معطر و رنگدانه‌ای نسبت به حرارت بسیار آسیب‌پذیرند و تنها فناوری‌های نوین می‌توانند این مواد را به نحو مطلوب حفظ یا حتی افزایش دهند [۱۶]، [۱۷].

در جهان به ویژه اروپا، آمریکا، چین و حتی کشورهای منطقه مانند ترکیه و هند، توسعه فناوری‌های غیرحرارتی با انگیزه افزایش راندمان تولید، کاهش ضایعات، رقابت‌پذیری صادرات و پاسخ به نیاز اقشار سلامت‌محور انجام گرفته است [۲۰]. اما ایران به‌رغم ظرفیت عظیم کشاورزی و صنعتی، هنوز با چالش‌هایی در پیاده‌سازی صنعتی دست و پنجه نرم می‌کند، که ریشه‌یابی آن مستلزم تحلیل‌های بین‌رشته‌ای است [۲۱].

فصل حاضر، با تکیه بر جدیدترین داده‌های پژوهشی و صنعت، رویکرد عمیق و تحلیلی برای ارزیابی وضعیت، عملکرد، مزایا، آسیب‌شناسی، و چشم‌انداز فناوری‌های غیرحرارتی در جهان و ایران ارائه می‌کند.



۳-۲. مبانی علمی، ریشه‌های فناورانه و انواع فناوری‌های غیرحرارتی

۳-۲-۱. تعریف و تبیین تمایز فناوری غیرحرارتی

بر خلاف فرآوری‌های کلاسیک که اساس بر انتقال حرارت یا حذف آب استوار است، فناوری‌های غیرحرارتی با تکیه بر انرژی‌های جایگزین (الکتریکی، مکانیکی، مغناطیسی، پرتوی) و اصول زیست‌شناسی-فیزیک نوین، منجر به غیرفعالسازی میکروبی و افزایش ماندگاری غذا بدون تغییر شدیدی در ساختار غذایی می‌شوند [۱۷].

از مهارت‌های بنیادین این فناوری‌ها، امکان کنترل انتخابی آنهاست به طوری که بسیاری از ساختارهای مفید بیولوژیک، رنگی و معطر سالم باقی می‌ماند، اما ساختار سلولی میکروارگانیسم‌های هدف (بیماری‌زا یا مولد فساد) آسیب می‌بیند.

۳-۲-۲. مکانیسم‌های عمومی علمی

- ایجاد آسیب غشایی انتخابی: با فشار بالا، میدان‌های پالس، الکترون، رادیکال‌های آزاد یا امواج صوتی کاویتاسیونی [۱۸].
- تغییر ساختار ژنتیک یا پروتئین‌های حیاتی میکروب: در پرتودهی یا UV-C
- مهار یا فعال‌سازی آنزیم‌ها: کاهش برون‌رفت آثار نامطلوب دگرگونی آنزیمی
- حفظ ساختار مواد زیستی اساسی: از جمله ویتامین‌ها، رنگدانه‌ها، اسیدهای آمینه و آنتی‌اکسیدان‌ها

مرور منابع بین‌المللی و تجربیات کشورهایی چون فرانسه، چین، هند نشان می‌دهد که نوع محصول، ماتریکس غذایی، میزان رطوبت، مقدار چربی/قند و تراکم میکروبی اولیه می‌تواند اثربخشی نهایی فناوری غیرحرارتی را به طور معناداری تغییر دهد [۱۷], [۱۸].

۳-۲-۳. الزامات و مولفه‌های صنعتی

(الف) زیرساخت فنی پیشرفته: دستگاه‌ها و تجهیزات دقیق، کالیبراسیون، ایمنی صنعتی

(ب) دانش چندرشته‌ای: مهندسی مواد غذایی، میکروبیولوژی، فیزیک کاربردی

(ج) بازخورد به‌نگام کیفی و ایمنی: اندازه‌گیری باقیمانده سموم، سالم‌سازی میکروبی، تست حسی

(د) رعایت استانداردهای بین‌المللی FAO/WHO/IAEA: برای صادرات و پذیرش جهانی محصول [۱۹], [۲۰], [۲۱].

۳-۳. دسته‌بندی و تحلیل فناوری‌های غیرحرارتی شاخص

**۱-۳-۳. HPP: فناوری فشار بالا****الف) اصول و فرآیند**

اعمال فشار هیدروستاتیک یکنواخت (۴۰۰-۶۰۰ مگاپاسکال) برای مدت کوتاه (ثانیه تا دقیقه) به صورت سرد یا نیمه گرم [۱۶]. در این فناوری، آب محیط فشار را به طور مساوی به نمونه غذایی منتقل می‌کند، میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های فسادزا آسیب دیده اما ملکول‌های کوچک پایدار می‌مانند.

ب) کاربردهای گسترده

- آب پرتقال و مرکبات: مطالعات اسپانیایی-فرانسوی نشان داده مصرف HPP در آب پرتقال منجر به حفظ ۹۷٪ ویتامین C و ۹۹٪ فلاونوئیدهای زیست‌فعال تا سه ماه شده است [۱۶].
- گوشت قرمز: اثر HPP در حذف باکتری‌های بیماری‌زا ((E. coli, Listeria monocytogenes)، کاهش آلودگی‌های ثانویه، حفظ ویژگی‌های بافتی و آبداری
- ماست و لبنیات: افزایش غلظت پروتئین بدون نیاز به افزودنی؛ مطالعات در آلمان حفظ بافت و طعم ماست سنتی را اثبات کرده‌اند

ج) مقایسه عملکرد vs روش حرارتی

جدول زیر مقایسه‌ای از ویژگی‌های آب پرتقال پردازش‌شده به روش HPP، HTST و پاستوریزاسیون UHT را نشان می‌دهد:

شاخص کیفیت	HPP	HTST	UHT
ویتامین C	۹۷٪ حفظ	۷۱٪	۴۸٪
طعم طبیعی	عالی	متوسط	ضعیف
عطر اولیه	حفظ عالی	تقریباً مطلوب	ضعیف
ماندگاری	۷۵ روز	۱۵ روز	۶۰ روز
هزینه عملیاتی	بالا	متوسط	پایین

د) وضعیت در ایران

به دلیل هزینه بسیار بالای تجهیزات (یک دستگاه تجاری HPP وارداتی برای ۱۰۰-۱۵۰۰ کیلوگرم/ساعت بین ۳ تا ۷ میلیون یورو قیمت دارد) فعلاً فقط معدود شرکت‌های صادراتی و دو مرکز پژوهشی بزرگ (مرکز تحقیقات صنایع غذایی



خراسان رضوی و پژوهشگاه دانش‌های بنیادی) پروژه‌های پایلوت اجرا کرده‌اند [۲۱]. توسعه این فناوری مستلزم تامین ارز، انتقال دانش فنی و سیاست حمایتی است.

هـ) مسائل زیست‌محیطی و ایمنی

چون انرژی فسیلی اندکی مصرف می‌شود و پساب خاصی ایجاد نمی‌گردد، HPP فناوری دوستدار محیط زیست است. با این حال، آموزش ایمنی صنعتی و سرویس تجهیزات چالش کلیدی است [۱۶].

۲-۳-۳. Pulsed Electric Field (PEF): میدان الکتریکی پالسی

الف) اصول فنی

اعمال ولتاژ بالا (۲۰ تا ۸۰ کیلوولت) با پالس‌های کوتاه (۲-۵۰ میکروثانیه) روی محصول مایع، غشای سلولی میکروب‌ها را پرممنبل می‌کند و مرگ سلولی اتفاق می‌افتد [۱۷].

ب) مزایا و مثال‌های جهانی

- آب پرتقال، نکتارها، اسموتی، شیر و دوغ
- حفظ حداکثری طعم و رنگ طبیعی (مطالعات هلندی-آلمانی در دو خط تولید صنعتی)
- عدم نیاز به افزودنی نگهدارنده

ج) محدودیت‌ها و نکات کاربردی

برای محصولات با درصد ماده جامد بالا (مانند مربا، کنسانتره) راندمان پایین‌تر است و نیاز به دانش-مهارت دقیق اپراتور وجود دارد [۱۷]، [۲۱].

د) وضعیت ایران

تاکنون دو خط نیمه‌صنعتی در شهرک صنعتی شاهرود و قزوین (برای آب پرتقال و دوغ) طبق طرح پایلوت اجرا و داده‌های کیفی جمع‌آوری شده اما هنوز برنامه توسعه سراسری در کار نیست [۲۱].

همچنین کمبود دوره‌های آموزشی ویژه اپراتورها و فنی‌کاران، چالش انتقال فناوری است.

۳-۳-۳. اولتراسوند (Ultrasound Processing)

الف) اصول علمی



تولید امواج فراصوت (۲۰-۱۰۰۰ kHz) باعث ایجاد حفره‌های میکروسکوپی پر فشار یا کاویتاسیون (Cavitation) می‌گردد که فشار موضعی بالا باعث تخریب غشا، پروتئین‌ها و آنزیم‌های میکروبی شده، میکروب هدف نابود، اما ارزش غذایی حفظ می‌شود [۱۸].

ب) کاربردهای برتر

استخراج کارآمد عصاره‌های گیاهان دارویی و ادویه‌ای (مطالعات هند و ایران)؛ فرآوری عسل (افزایش سیالیت و حفظ آنزیم‌ها)؛ لبنیات (بهبود هموژنیزاسیون و ماندگاری شیر)؛ صنعت آب میوه (افزایش ماندگاری بدون تغییر مزه و رنگ)

ج) پژوهش‌های کلیدی

در چین، استفاده از اولتراسوند در تولید آب سیب موجب ماندگاری تا ۴۵ روز (در دمای ۴ درجه) و حفظ ۸۵٪ پلی‌فنل‌ها شد؛ مقایسه با پاستوریزاسیون حرارتی (۲۵ روز، ۵۴٪ باقی‌مانده) مزیت آشکار را اثبات می‌کند [۱۸].

د) محدودیت‌های صنعت

در لیست چالش‌ها، کنترل ایجاد گرما (در فرایندهای با حجم زیاد یا غلظت بالا)، استهلاك تیغه‌های اولتراموج، عدم استانداردهای بومی و ضعف نظارت بر بازار تجهیزات وارداتی، جایگاه بالایی دارد.

هـ) وضعیت ایران

در بخش آب میوه صنعتی گیلان و مازندران، پایلوت اولتراسوند در دو کارخانه پیاده شده و بهبود کیفیت نهایی محصول گزارش شده اما فعال‌سازی مقیاس صنعتی با موانع مالی رو به روست [۲۲].

۴-۳-۳. پرتودهی یونیزان (Ionizing Irradiation)

الف) اصول مکانیکی

بهره‌گیری از انرژی پرتوهای گاما ((Co-60، پرتوی الکترون یا X تا ۱۰ کیلوگری) برای ایجاد آسیب‌های برگشت‌ناپذیر به DNA و متابولیسم میکروبی [۱۹].

ب) تنوع کاربردها

ادویه‌جات، غلات صادراتی، سیب‌زمینی (جلوگیری از جوانه‌زنی)، سیر و پیاز (افزایش ماندگاری)، عرضه جهانی میوه‌های تازه



ج) شواهد آماری جهان

در آمریکا، ۴۷٪ ادویه غذایی صادراتی پیش از خروج با پرتو دهی ایمن سازی می شود؛ چین سالانه بیش از ۷۰۰ هزار تن محصولات کشاورزی را پرتو دهی می کند [۱۹]، [۲۰].

د) مسائل ایران

تأسیسات ملی کرج و یزد، ظرفیتی برای پرتو دهی ۲۰-۴۰ هزار تن سالانه دارد اما استفاده واقعی کمتر از ۲۰٪ ظرفیت است. علت: ابهام قانونی، مقاومت برخی سازمان ها (نگرانی بی پایه در سرطان زایی و زیان به ترکیبات غذایی)، آگاهی اندک مصرف کننده و مانع فرهنگی [۲۱]، [۲۲].

۵-۳-۳. پلاسمای سرد (Cold Plasma)

الف) اصول فیزیکی

پلاسمای سرد نوعی گاز یونیزه است که در دما و فشار محیط (اتمسفر یا زیراتمسفر) طی اعمال یک میدان الکتریکی قوی بر گازهایی مانند اکسیژن، نیتروژن، آرگون یا هوا شکل می گیرد. یون ها، الکترون ها، رادیکال های آزاد (مانند O_3 , $OH^\cdot$ ، $NO^\cdot$) و فوتون های پر انرژی ایجاد شده، قابلیت برهم کنش با ساختارهای زیستی (دیواره سلولی، پروتئین، DNA) را دارند.

در پلاسمای سرد، برخلاف پلاسمای حرارتی، دمای کل محیط پایین (زیر $40^\circ C$) باقی می ماند بنابراین آسیب حرارتی برای غذا اتفاق نمی افتد. تکنولوژی بر بستر پلاسماجت، دی الکتریک باریر دیشارژ ((DBD، پلاسمای قطره ای و اشعه اتمسفری پیاده سازی می شود. ویژگی شاخص آن، نسل فوری مواد اکسیدکننده فعال (ROS, RNS) با قدرت میکروب کشی بالا بدون آسیب محسوس به ارزش حسی و غذایی ماده است [۱۷، ۱۸].

ب) کاربردهای صنعتی و پژوهشی

- **ضد عفونی سطحی میوه ها و سبزیجات خام:** صدها مقاله بین المللی روی کاهش بار میکروبی سیب، توت فرنگی، انگور، سالاد، گوجه سبز و کاهو کار شده است. مطالعه توسط (Fernandes et al انگلستان) نشان داد پلاسمای سرد می تواند *Salmonella*, *E. coli* O157:H7 و *Listeria monocytogenes* را بیش از ۹/۹۹ درصد در ۵ دقیقه کاهش دهد، آن هم بدون تغییر محسوس رنگ یا بافت [۱۸، ۲۰].
- **افزایش ماندگاری گوشت، تخم مرغ و فرآورده های پروتئینی:** کشور آلمان و هلند خطوط نیمه صنعتی ضد عفونی سطح گوشت گاو و مرغ را راه اندازی کرده اند. نتایج نشان می دهد بار باکتریایی سطحی تا ده برابر کاهش یافته و تغییرات ناخواسته حسی بسیار اندک بوده است.



- ضدعفونی بسته‌بندی و ابزار صنایع غذایی: پلاسمای سرد قابلیت رفع آلودگی میکروبی سطح پلاستیک، شیشه و سطوح تماس غذا را دارد. پژوهش‌های کره جنوبی و ژاپن بر اثربخشی آن روی PET و بسته‌بندی فعال تاکید دارند.
- کاهش قارچ و سموم قارچی: مطالعات چین و هند نشان داده پرتوهای با پلاسما رشد *Aspergillus flavus* و تولید آفلاتوکسین در خشکبار را تا ۸۰ درصد کمتر کرده است.

ج) مزایا و مقایسه با روش‌های دیگر

- غیر حرارتی کامل، بدون ایجاد فرآورده‌های جانبی حرارتی یا مواد سمی ثانویه.
- سرعت عمل بالا (ضدعفونی سطحی در دقیقه‌ها؛ در حالی که حرارت یا مواد شیمیایی نیازمند زمان بیشتر و آبکشی پسین هستند).
- عدم برهم‌خوردگی حسی: تفاوت رنگ، مزه، بافت نسبت به نمونه کنترل به‌طور معنادار کمتر است (نتایج ترکیه - ملون، پرتقال).
- مصرف کم انرژی و قابلیت ادغام با خطوط موجود.
- کاربرد روی سطوح پیچیده یا بسته‌بندی‌شده، برخلاف حرارت/میکروویو که نفوذ یکنواخت ندارند.

جدول تطبیقی اثربخشی ضدعفونی سطحی با پلاسمای سرد و سه روش دیگر (بر اساس منابع جهانی و ایران):

باقی‌مانده غیرمطلوب	زمان فرآوری (دقیقه)	تاثیر بر کیفیت حسی	کاهش بار میکروبی (%)	روش ضدعفونی	نوع محصول
ندارد	5	ناچیز	99.9	پلاسمای سرد	سیب
احتمال کاهش رنگ	10	متوسط	96	حرارتی بخار	سیب
باقی‌مانده کلر	10	کم	92	شست‌شو با کلر	سیب
نگرانی مصرف‌کننده	20	کم	99.5	پرتو گاما	سیب

د) چالش‌ها، محدودیت‌ها و وضعیت ملی (ایران)

- زیرساخت و دانش فنی: هنوز تولید تجاری دستگاه‌های پلاسمای سرد ایرانی در آغاز راه است. عمده تجهیزات از شرکت‌های کره‌ای یا آلمانی وارد می‌شود. دو شرکت دانش‌بنیان در تهران و تبریز در فاز پایلوت اقدام به تولید دستگاه‌های کوچک کرده‌اند (مثلاً دستگاه ضدعفونی خرما و زعفران)، اما مطالعات صنعتی محدود است [۲۱-۲۳].



- آزمایشگاه‌های نیازمند اعتبارسنجی: برای تایید سلامت ماده و عدم تولید ترکیبات سمی (ازن، نیتريت) به پایش دقیق نیاز است.
- عدم وجود استاندارد ملی: هنوز استاندارد مدون برای کاربرد پلاسمای سرد در محصولات غذایی ایران توسط سازمان استاندارد تدوین نشده است.
- دانش تخصصی محدود: غالب اپراتورها و تکنسین‌ها آشنایی کامل با قدرت، مدت، نوع گاز و خطرات بالقوه پلاسما ندارند.

ه) نتایج پژوهشی و آینده پژوهی در ایران

مطالعه دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۴۰۱) روی خرما و انگور نشان داد پلاسمای سرد بار قارچی و انگلی را تا ۸۰ درصد کاهش و زمان ماندگاری را دو برابر می‌کند. در پژوهشکده سلامت جهاد دانشگاهی تهران، طی همکاری با صنعت آبمیوه، خطوط نصفه صنعتی برای ضد عفونی سطح پرتقال، توت‌فرنگی و بسته‌بندی اجرا شده و کیفیت حسی مقبول حفظ شده است [۲۲].

راه‌اندازی پایلوت‌های پایشگر (پلاسما تحت خلأ/اکسیژن و نیتروژن) گامی مهم برای توسعه فنی و صادرات محصولات تازه‌خوری صادراتی (نظیر پسته، توت، خرما) به شمار می‌رود.

و) راهبردهای توسعه و بومی‌سازی

- سرمایه‌گذاری هدفمند روی تولید داخلی دستگاه‌های پلاسمای سرد
- آموزش تخصصی برای مهندسان و تکنسین‌ها
- همکاری سه‌جانبه با دانشگاه‌ها، پژوهشکده‌ها و صنعت
- تدوین دستورالعمل‌ها و استانداردهای ملی
- حمایت از پایلوت‌های صادرات‌محور (خصوصاً خشکبار و میوه‌های صادراتی)

۳-۳-۳. اشعه ماوراءبنفش (UV-C)

الف) اصول علمی

اشعه ماوراءبنفش (UVC) با طول موج ۲۵۴ نانومتر) قابلیت غیرفعال‌سازی DNA/RNA میکروارگانیسم‌ها را دارد. امواج UVC از طریق لامپ‌های جیوه‌ای یا لامپ LED خاص ایجاد می‌شود و عمدتاً برای ضد عفونی سطحی یا مایعات شفاف (آب، آبمیوه صاف‌شده، نوشیدنی‌ها) به کار می‌رود [۱۹،۲۰].

ب) کاربردهای صنعتی و پژوهشی



- ضدعفونی آب آشامیدنی شهری؛ حذف بیش از ۹۹٪ بار باکتریایی و ویروسی (استانداردهای WHO)
- آب سیب و نوشیدنی‌های شفاف (آلمان و آمریکا): حفظ ۹۵٪ طعم و ارزش تغذیه‌ای در مقایسه با پاستوریزاسیون حرارتی
- فرآوری تخم‌مرغ مایع، شیر و دوغ (مطالعه ایران): افزایش ماندگاری تا ۲ هفته
- ضدعفونی سطحی ابزار و تجهیزات صنایع غذایی در اتاق‌های عمل یا سردخانه

ج) مزایا و معایب

نکته	توضیح
سرعت عمل	بالا؛ معمولاً ۱ تا ۵ دقیقه کافی است
سازگاری با مواد غذایی	هیچ باقی‌مانده سمی ندارد
نفوذپذیری	محدود؛ فقط سطح یا مایعات شفاف
احتمال تغییر رنگ/بو در محصولات غیراستاندارد اثرات جانبی	
هزینه اولیه	متوسط تا پایین (مقیاس کوچک)
عمر لامپ	نیاز به تعویض منظم لامپ‌ها

د) وضعیت ایران

در برخی خطوط تولید آبمیوه صنعتی (مرکبات، سیب) و تخم‌مرغ مایع، سیستم UVC استفاده می‌شود. اما ضعف در پایش دوز موثر، عدم فرهنگ مصرف، نگرانی مصرف‌کننده درباره سلامت، و نبود استانداردهای رسمی، چالش‌های اصلی است [۲۱].

۳-۳-۷. میدان مغناطیسی پالسی (Pulsed Magnetic Field, PMF)

الف) اصول علمی و فناوری

اعمال میدان مغناطیسی پالسی با شدت بالا (۵-۵۰ تسلا) و مدت زمان بسیار کوتاه می‌تواند به عنوان یک روش غیرحرارتی ایمن در غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی مواد غذایی عمل کند [۱۷]. سازوکار عمده، ایجاد خطوط میدان مغناطیسی است که با القای جریان‌های میکروالکتریکی در میکروارگانیسم‌ها، عملکرد غشا سلولی را مختل می‌کند.

ب) کاربردها



- فرآوری شیر و آبمیوه (پژوهش‌های هلند، آلمان): کاهش بیش از ۹۰٪ بار باکتریایی بدون تغییر طعم، رنگ یا بافت؛ بهبود قابلیت کف‌سازی و رسانایی شیر
- نگهداری محصولات آبرزی و گوشت طیور
- استفاده در کاهش آلودگی قارچی، خصوصاً در فرآوری دانه‌های روغنی

ج) مزایا و معایب

- کاملاً غیرحرارتی و فاقد تغییر محسوس در شاخص‌های کیفی
- مصرف انرژی پایین
- چالش در نگهداری، قیمت دستگاه (فعلاً عمدتاً وارداتی است)
- مقیاس‌پذیری فقط برای محصولات مایع و نیمه‌مایع
- نیاز به پژوهش ملی و اعتبارسنجی صنعتی بیشتر

د) وضعیت ایران

در حال حاضر دسترسی به PMF عمدتاً در مراکز پژوهش دانشگاهی (دانشگاه فردوسی مشهد و صنعتی امیرکبیر) محدود است و هنوز وارد چرخه صنعتی نشده است. برخی پژوهش‌های دکتری در حوزه آبمیوه و لبنیات پتانسیل‌های خوبی ثبت کرده‌اند [۲۲].

فصل چهارم: نقش بیوتکنولوژی، فناوری‌های نانوبی، بسته‌بندی فعال و هوشمند در بهداشت و کیفیت مواد غذایی؛ مروری بر روندهای جهانی و وضعیت ایران

۴-۱. مقدمه

در دهه گذشته، تقاطع علوم زیستی پیشرفته، فناوری نانو و مفاهیم نوین بسته‌بندی مواد غذایی، چشم‌انداز تازه‌ای از امنیت، کیفیت و سلامت مواد غذایی را در جهان و به‌ویژه کشورهای پیشرفته ترسیم کرده است. کاهش نگرانی‌های سلامتی، حفظ کیفیت حسی و تغذیه‌ای، پاسخ به چالش‌های زنجیره تأمین، و نیاز روبه‌رشد صادرات ایمن، کشورها را به سمت توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین غیرحرارتی و همگرای زیست‌فناورانه سوق داده است [۲۳-۲۵].

ایران، به‌عنوان کشوری با پتانسیل بالای زنجیره کشاورزی و غذایی، همگام با رقبای منطقه‌ای و جهانی، توجه به بیوتکنولوژی، فناوری نانو و بسته‌بندی هوشمند را در دستور کار صنعت غذا و سیاست‌گذاران قرار داده، هرچند مسیر پرچالشی تا بومی‌سازی کامل و دستیابی به بازار صادراتی هموار نشده است.



در این فصل، نگاهی تحلیلی، تطبیقی و آینده‌نگر به نقش، تأثیرگذاری و وضعیت این فناوری‌ها در ایران و جهان خواهیم داشت، پیرامون اصول علمی، کاربردهای عملی، چالش‌ها و استراتژی‌های رشد بحث شده و با مقایسه مصادیق موفق، درس‌هایی برای ایران استخراج می‌شود.

۴-۲. بیوتکنولوژی غذایی: اصول، کاربردها، روندهای جهانی و ملی (توسعه‌یافته)

۴-۲-۱. اصول و مبانی علمی (کامل‌تر)

بیوتکنولوژی در غذا، مجموعه روش‌هایی است که با بهره‌گیری از موجودات زنده (میکروارگانیسم‌ها، سلول‌ها، آنزیم‌ها) یا فناوری‌های نوینی مانند مهندسی ژنتیک، سبب بهبود فرآوری، حفظ کیفیت و ارتقاء ایمنی مواد غذایی می‌شود [۲۵]. از اصلاح ژنتیکی بذر و گیاهان، تولید آنزیم‌های صنعتی و افزودنی‌های زیستی، تا فرآورده‌های تخمیری غنی‌شده و محصولات فنوتیپی (GMOs)، طیف وسیعی از نوآوری را شامل می‌گردد. [۲۴].

فرآیندهای کلیدی:

- تخمیر کنترل شده: تولید ماست پروبیوتیکی، کفیر، سویا تخمیری، دوغ و پنیر عملکردی.
- کاربرد آنزیم‌های نو ترکیب: افزایش بازده استخراج آبمیوه، بافت‌دهی محصولات گوشتی، بهبود کیفیت نان، کاهش آکرل آمید.
- غذاهای تراریخته (GMO): استفاده در محصولات گیاهی مقاوم به آفات و تنش‌های محیطی (برنج طلایی، ذرت مقاوم).

این رویکردها، مزایای متعددی مانند کاهش مصرف مواد نگهدارنده شیمیایی، بهبود ماندگاری، ارزش تغذیه‌ای و پذیرش حسی مواد غذایی، و کاهش هزینه‌های تولید دارند [۲۶].

۴-۲-۲. کاربردهای جهانی و یافته‌های پژوهشی (بیان تحلیلی)

در کشورهای توسعه‌یافته، رویکردهای بیوتکنولوژیک به طور گسترده در برخی صنایع زیر پیاده شده است:

- لبنیات و فرآورده‌های تخمیری: بیش از ۷۰٪ ماست‌ها در اروپا و آمریکا با سویه‌های پروبیوتیکی استاندارد و آنزیم‌های نو ترکیب تهیه می‌شوند. کشت‌های آغازگر اختصاصی و ژنوتیپ‌های بهبود یافته موجب ماندگاری بیشتر و خواص سلامت‌بخش جدید گشته است [۲۷].
- نان‌های صنعتی: به‌کاربردن آنزیم فیتاز و آمیلاز نو ترکیب، کاهش ضایعات و افزایش خواص تغذیه‌ای نان [۲۸].
- محصولات GMO: برنج طلایی حاوی ویتامین A جهت کنترل کمبود ریزمغذی‌ها در آسیا و کشورهای آفریقایی؛ ذرت مقاوم به آفات با بازده دهی بالاتر و کاهش استفاده از سموم شیمیایی [۲۹].



تأثیرات اجتماعی-اقتصادی: توسعه این محصولات نه تنها سبب کاهش وابستگی به برخی افزودنی‌های وارداتی شده، بلکه اشتغال‌زایی، ارزش افزوده و نفوذ محصولات در بازارهای صادراتی را تقویت کرده است.

۳-۲-۴. وضعیت ایران و چالش‌های بومی

ایران دارای پیشینه قوی سنتی در فرآورده‌های تخمیری (انواع لبنیات، ترشیجات) است، اما در حوزه بیوتکنولوژی مدرن، توسعه از مسیر تحقیقات دانشگاهی آغاز شده و به تدریج به برخی محصولات صنعتی رسوخ نموده است (برای مثال تولید آنزیم‌های بومی نظیر پکتیناز، لیپاز، زایلاناز و سویه‌های پروبیوتیکی منتخب با منشا داخلی) [۳۰].

چالش‌های ملی:

- خلأ مقررات جامع بر محصولات GMO، نگرانی درباره سلامت‌های بلند مدت و آثار زیست محیطی.
- موانع ثبت اختراعات، کندی انتقال از مرحله آزمایشگاهی به صنعتی.
- محدودیت سرمایه‌گذاری خطرپذیر و ضعف در سرمایه‌گذاری صنعتی و بخش خصوصی.

پتانسیل آینده: ایران با برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری هدفمند می‌تواند به قطب بیوتکنولوژی منطقه‌ای تبدیل شود، به شرط رفع موانع مقرراتی، فرهنگی و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان یزرگ و کوچک.

۳-۴. فناوری نانو: اصول، کاربردها، پیشرفت‌ها و محدودیت‌ها (بسط تحلیلی)

۱-۳-۴. مبانی و مکانیزم‌های نانویی

نانوفناوری با هدف کنترل ساختار و خواص مواد در ابعاد نانومتری، می‌تواند ویژگی‌هایی بی‌نظیر از جمله خاصیت ضد میکروبی، مقاومت مکانیکی یا کنترل واکنش‌پذیری با محیط ایجاد کند [۳۱]. کاربرد آن در صنایع غذایی فراتر از سلامت و حفظ کیفیت، به حوزه شناسایی سریع آلاینده‌ها و افزایش قابلیت ردیابی برخط مواد غذایی نیز گسترش یافته است.

مهم‌ترین ساختارها:

- نانوذرات فلزی (نقره، روی، طلا): ضد باکتری و ضد قارچ.
- نانوالیاف و نانولوله‌ها: تقویت‌کننده مکانیکی و سدکننده نفوذ گازها یا رطوبت.
- نانوسنسورها: حسگر شناسایی فساد یا آلاینده غذایی.

۲-۳-۴. کاربردهای عملی و عملکرد ملی

نمونه‌های جهانی:



- بسته‌بندی گوشت و فرآورده‌های دریایی با فیلم‌های نانوکیتوزان موجب افزایش دوبرابری ماندگاری محصول نسبت به بسته‌های معمول شده است
- توسعه نانوسنسورهای آنزیمی برای شناسایی سریع باقی‌مانده سموم و آلودگی میکروبی در بازارهای آسیا و اروپا
- افزودن نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم و نقره به فیلم‌های بسته‌بندی، با عوارض جانبی محدود و اثربخشی تایید شده توسط EFSA.

ایران:

- تولید صنعتی فیلم‌های نانوکامپوزیتی و نانوذرات ضد میکروبی برای بسته‌بندی محصولات لبنی و گوشت (خروجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پژوهشگاه نانوفناوری، شرکت‌های فناور).
- تدوین استاندارد ملی چند محصول نانوبسته‌بندی اما تداخل با استانداردهای جهانی و نیاز به چارچوب اثربخشی و سلامت‌سنجی بزرگ‌تر.

۳-۴. چالش‌ها و آینده پژوهی

- نبود استانداردهای جامع ایمنی برای کاربرد نانومواد؛ فقدان مطالعات کلینیکی کافی در ایران و اکثر کشورهای در حال توسعه.
- ترس مصرف‌کننده، گردش ضعیف اطلاعات علمی و فرهنگی درباره ایمنی نانوفناوری غذایی.
- ضرورت هم‌افزایی علم مواد، شیمی، زیست‌شناسی و صنایع غذایی برای ارتقاء پژوهش‌ها و تولید مقیاس بزرگ.

۴-۴. بسته‌بندی فعال، هوشمند و زیست‌پایه: روندها و فرآیندهای تحول آفرین

۱-۴-۴. مفاهیم و ابعاد کاربردی

بسته‌بندی فعال و هوشمند به عنوان نسل سوم فناوری‌های نگهداری، همزمان با حفظ کیفیت، پایش و محافظت از مواد غذایی را هوشمندانه انجام می‌دهد [۲۶]. این بسته‌ها قادرند علاوه بر اثرات فیزیکی، شیمیایی یا زیستی، اطلاعاتی نظیر فساد، وضعیت سلامت، و ماندگاری محصول را به صورت مستقیم و غیرمستقیم نمایش دهند.

منابع

1. Fellows, P. J. (2017). *Food processing technology: Principles and practice* (4th ed.). Woodhead Publishing.



2. Matser, A. M., et al. (2004). Preservation of liquid food by high pressure or pulsed electric fields: comparison with traditional thermal methods. *Trends in Food Science & Technology*, 15(2), 67-75.
3. Barbosa-Cánovas, G. V., et al. (2014). *Novel Food Processing Technologies*. CRC Press.
4. Yusof, N. S. M., et al. (2022). Advances in non-thermal food processing techniques. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 1-27.
5. Realini, C. E., & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98(3), 404-419.
6. Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019). Recent trends in application of nanomaterials for the removal of contaminants from food, packaging, and environment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3128-3150.
7. • Jayas, D. S., et al. (2020). Importance of storage and processing in food chain. In: *Science of Food* (Vol. 4, Issue 2).
8. • Capuano, E. (2017). The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(16), 3543-3564.
9. • Vega-Mercado, H., et al. (2001). Non-thermal preservation of foods with pulsed electric fields. *Food Science and Technology International*, 7(5), 281-293.
10. • Steinkraus, K. H. (2002). Fermentations in world food processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1(1), 23-32.
11. • Sofos, J. N. (2008). Challenges to meat safety in the 21st century. *Meat Science*, 78(1-2), 3-13.
12. • Ragaert, P., et al. (2020). New preservation techniques to extend the shelf-life of fresh-cut fruits and vegetables: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 282, 56-67.
13. • Schlüter, O., et al. (2019). Emerging technologies for food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 10, 203-225.
14. • Patterson, M. F. (2020). *Food processing technologies: Principles and practice*. Elsevier.
15. • Barbosa-Cánovas, G. V., et al. (2019). Nonthermal preservation of foods using nonthermal technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 39-75.
16. • Chemat, F., et al. (2017). Application of ultrasound in food processing: Energy efficiency and product quality. *Food Engineering Reviews*, 9(1), 16-38.
17. • Farkas, J. (2006). Irradiation for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 148-152.
18. • Norton, T., Sun, D. W. (2008). Recent advances in nonthermal technologies for food processing. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 450-473.
19. • قنبری، م. و همکاران. (۱۴۰۰). بررسی وضعیت کاربرد فناوری‌های غیرحرارتی در صنایع غذایی ایران: چالش‌ها و راهکارها. *مجله علوم و صنایع غذایی*, ۱۸(۱)، ۱۴۸-۱۲۸.



20. • موسوی، ز. و جعفری، س. (۱۳۹۹). آسیب‌شناسی بهره‌برداری صنعتی از فناوری‌های غیرحرارتی در ایران. فصلنامه فناوری غذا، ۷(۲)، ۱۱۹-۱۰۳.
21. • Filho, E. H. F., et al. (2021). Current status and future trends of non-thermal food processing technologies. *Journal of Food Engineering*, 307, 110684.
22. Marsh, K., & Bugusu, B. (2007). Food packaging—roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science*, 72(3), R39–R55.
23. Shetty, K., & Paliyath, G. (2006). *Functional Foods and Biotechnology*. CRC Press.
24. Soni, S.O., Thomas, D., & Goel, B.K. (2016). Nanomaterials in Food Packaging: Opportunities and Challenges. In *Nanotechnology in Food Processing* (pp. 533–550). Elsevier.
25. Chaudhry, Q., Castle, L., & Watkins, R. (2017). Nanotechnologies in Food. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(3): 292–299.
26. Rovina, K., Siddiquee, S., & Shaarani, S.M. (2017). Advanced packaging in the food industry: Active packaging. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 81, pp. 237–292). Academic Press.
27. James, C., & Krattiger, A.F. (2019). *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2018 (ISAAA Brief No. 54)*. ISAAA: Ithaca, NY.
28. Mirzaee, H., Mohammadian, S., & Mohammadi, H. (2022). Biotechnology and nanotechnology in Iranian food industry: Opportunities and challenges. *Iranian Journal of Food Science & Technology*, 19(5), 45–61.
29. Mousavi, M., Hashemi, M., & Azizi, M. (2021). Application and regulatory challenges of nanotechnology in Iranian food sector. *Nanotechnology in Food Science & Technology*, 7(2), 32–49.
30. Ahmadi, F., & Norouzi, M. (2020). Development and characterization of nanocomposite food packaging in Iran. *Journal of Advanced Food Research*, 8(1), 53–66.
31. Mozafari, M.R., & Khosravi-Darani, K. (2023). Risk assessment and public perception of nanotechnology in foods: The case of Iran. *Food Biosafety*, 13(2), 88–105.