



نقش فناوری‌های غیرحرارتی در کنترل پاتوژن‌های غذایی: رویکردی نوین به جای روش‌های حرارتی سنتی

زینب مهدوی^{*}، فاطمه زهرا شیرزاد^۲.

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

4901551558@iaui.ir

۲- دانشجوی دکترای علوم و صنایع غذایی، گرایش تکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.

Fatemehzahra.Shirzad@iaui.ac.ir

چکیده

فناوری‌های غیرحرارتی، به عنوان جایگزین‌هایی نوآورانه و مؤثر به جای روش‌های حرارتی سنتی، با حفظ ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات غذایی و بدون ایجاد آسیب‌های ناخواسته حرارتی امکان غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را فراهم می‌کنند. در این مقاله مروری، آخرین پیشرفت‌ها، مبانی علمی و مکانیسم‌های عملکرد فناوری‌های غیرحرارتی شامل فرآوری با فشار بالا، میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد و فراصوت مورد بررسی قرار گرفته است. اثربخشی این روش‌ها در کاهش بار میکروبی پاتوژن‌های پرخطر همچون *Salmonella enterica*، *Escherichia coli* و *Listeria monocytogenes* و حفظ معیارهای حسی و تغذیه‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی کاربرد صنعتی این فناوری‌ها نشانگر رشد قابل توجه در صنایع مختلف غذایی از جمله صنایع آبمیوه‌ها، لبنیات و محصولات گوشتی بوده است؛ اما با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالای تجهیزات، عدم همگنی ساختار مواد غذایی و کمبود استانداردهای نظارتی مانع از گسترش بیشتر آن‌ها به مقیاس وسیع‌تر صنعتی شده است. این مقاله با تحلیل این چالش‌های فنی، اقتصادی و ایمنی رویکردهایی برای توسعه مدل‌های پیشرفته در کنترل بیشتر و استانداردسازی جامع مطرح می‌کند. چشم‌انداز آینده فناوری‌های غیرحرارتی با تأکید بر ترکیب آن‌ها با منابع انرژی تجدیدپذیر، ارتقاء پایداری زیست‌محیطی و پذیرش مصرف‌کننده شکل گرفته است. این بازنگری، نقشه راهی علمی و کاربردی برای انتقال موفق فناوری‌های غیرحرارتی به صنعت مواد غذایی ارائه می‌دهد که می‌تواند به تولید محصولات سالم‌تر، با حداقل فراوری و همچنین با کیفیت حسی بالاتر و ایمنی تضمین شده بینجامد.

کلمات کلیدی: فناوری‌های غیر حرارتی، پاتوژن‌های غذایی، ایمنی میکروبی، فرآوری با فشار بالا، میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد، فراصوت، سلول‌های زنده غیر قابل کشت

۱. مقدمه

در دهه اخیر، با توجه به افزایش آگاهی جامعه نسبت به سلامت و کیفیت مواد غذایی و تغییرات قابل توجه در ترجیحات مصرف‌کنندگان به سوی استفاده از محصولات غذایی تازه، طبیعی و با حداقل فرآوری، منجر به تمرکز تحقیقاتی گسترده



پژوهشگران در حوزه فناوری های نوین فرآوری مواد غذایی شده است تا ضمن حفظ ارزش تغذیه‌ای و ویژگی های حسی نظیر طعم، رنگ و بافت، بتوانند ایمنی میکروبی را نیز برای مصرف کنندگان تضمین کنند [۱-۳]. روش های حرارتی متداول نظیر پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون، گرچه در کنترل پاتوژن ها موثرند، اما می توانند موجب مشکلاتی از قبیل: تخریب ترکیبات حساس به حرارت و کاهش ویتامین ها و آنتی اکسیدان ها گردند. این تخریب عمدتاً ناشی از واکنش های اکسیداسیون و دناتوراسیون حرارتی است که در دماهای بالا تسریع می شوند. علاوه بر این، چنین فرآیندهایی، با تغییر ناخواسته در ساختار پروتئین ها و لیپیدها، از دست رفتن رطوبت، تغییر در ترکیب اسیدهای چرب و افزایش نرخ اکسیداسیون لیپیدی همراه اند، که منجر به افت کیفیت حسی و ارزش غذایی محصولات غذایی می گردد؛ همه این اثرات منفی باعث کاهش جذابیت ظاهری، طعمی و بافتی محصول شده و در نتیجه آن، منجر به کاهش میزان پذیرش مصرف کننده می شود [۴-۳۰]. به همین علت، ضرورت یافتن روش هایی که بتوانند ایمنی مواد غذایی را حفظ کرده و در عین حال کیفیت محصول را ارتقاء دهند، مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، فناوری های غیرحرارتی به عنوان جایگزین هایی نوین و پایدار، با هدف کاهش بار میکروبی در دماهای پایین و حفظ کیفیت تغذیه ای مطرح شده اند [۲-۴]. در این فناوری ها برخلاف روش های حرارتی سنتی، افزایش دمای مواد غذایی، در گستره ای بسیار محدود صورت می پذیرد؛ به همین دلیل، بهره گیری از این روش ها باعث حفظ ساختار مولکولی، خصوصیات حسی و بافت طبیعی محصولات غذایی می گردند [۳۱]. فناوری های غیرحرارتی با توجه به گستره و تنوع سازوکارهای عملکردی و مطابق با نوع انرژی اعمال شده و اثر اولیه، در سه دسته اصلی، شامل فناوری های مکانیکی (Mechanical)، الکتریکی (Electrical) و فیزیکوشیمیایی (Physicochemical) قابل طبقه بندی اند. هر یک از این رویکردها با تکیه بر اصول فیزیکی یا شیمیایی ویژه و بر اساس مکانیسم های اختصاصی موجب غیرفعال سازی مؤثر میکروارگانیسم ها و آنزیم ها شده و ضمن حفظ ویژگی های تغذیه ای و کیفیت حسی، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی را بهبود می بخشد [۳۲]. در بخش های بعدی این مقاله مروری، نمونه های شاخص هر دسته به تفصیل پرداخته خواهد شد. فناوری های مکانیکی غیر حرارتی شامل فرآوری با فشار بالا (HPP) و فراصوت (US) هستند؛ که به ترتیب بر پایه اعمال تنش هیدرواستاتیک و پدیده کاویتاسیون عمل می کنند [۱۰-۱۱]. فناوری های الکتریکی همچون میدان الکتریکی پالسی (PEF)، بر اساس شوک های الکتریکی با ولتاژ بالا در زمان بسیار کوتاه و با ایجاد اختلال در غشای سلولی استفاده میشود [۲۰]. و در آخر، فناوری های فیزیکوشیمیایی مانند پلاسما سرد (CP) از گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن (ROS و RNS) برای تخریب ساختارهای میکروبی بهره می گیرند [۸-۱۴]. مطالعات متعددی اثربخشی این فناوری ها را در کاهش بار میکروبی پاتوژن های مهمی نظیر *Salmonella*, *E. coli* و *Listeria monocytogenes* تأیید کرده است؛ این روش ها در شرایط آزمایشگاهی ضمن حفظ ارزش غذایی و کیفیت حسی مواد غذایی، کاهش جمعیت میکروارگانیسم ها را امکان پذیر می سازند [۷-۱۳]. علاوه بر این، فناوری های غیرحرارتی به دلیل مصرف انرژی بهینه و قابلیت هماهنگی کامل با سیستم های مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر، به عنوان رویکردی پایدار و دوستدار محیط زیست در صنایع غذایی مطرح می شود. این فناوری ها می توانند به کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از فرآوری های سنتی کمک کرده و نقش مؤثری در بهبود کارایی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ایفا نمایند [۲۳-۲۴]. با وجود این پیشرفت ها، چالش هایی از جمله ناهمگونی محصولات، هزینه بالای تجهیزات و کمبود استانداردهای نظارتی، مانع از پذیرش گسترده صنعتی این فناوری ها شده اند [۱۷-۱۸].

این مقاله با مرور برخی مطالعات انجام شده در سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ جهت ارائه چارچوبی مفهومی در زمینه پتانسیل فناوری های غیر حرارتی و بهره گیری از آن ها در صنعت غذا متمرکز شده است، تا با بررسی نحو عملکرد و اثربخشی این فناوری در کنترل پاتوژن های مواد غذایی و شناخت چالش ها و محدودیت های موجود، کاربرد صنعتی و ارائه پیشنهادات؛



چشم انداز آینده این فناوری را محقق سازد.

۲. مبانی و مکانیسم های عملکرد فناوری های غیر حرارتی

فناوری های غیرحرارتی، به عنوان رویکرد هایی نوآورانه در زمینه فرآوری مواد غذایی، بر پایه مکانیسم های فیزیکی و شیمیایی متنوع ای شکل گرفته‌اند. این روش ها همزمان با حفظ خواص طبیعی و ارزش غذایی محصولات، ایمنی میکروبی را نیز به طور موثری تضمین کرده و با تکیه بر اثرات اختصاصی انرژی های فیزیکی و شیمیایی، جایگزین هایی کارآمد نسبت به فناوری های حرارتی هستند. در این بخش به بررسی مبانی علمی، اصول عملکردی و پارامتر های کلیدی مهم ترین این فناوری ها، که در حال حاضر کاربرد وسیعی نیز در صنایع غذایی یافته‌اند، پرداخته خواهد شد تا درک جامعی از قابلیت و پتانسیل توسعه این روش ها حاصل گردد [۷-۹]. سازوکار اصلی این روش ها بر اثر برهم کنش مستقیم با غشاهای سلولی، پروتئین ها، آنزیم ها و مواد ژنتیکی استوار است. این فناوری ها با ایجاد اختلالات فیزیکی و شیمیایی مانند نفوذپذیری غشایی، تغییر ساختار پروتئینی و مهار فعالیت های آنزیمی، مرگ میکروبی را القا می کنند این در حالی است که تخریب ساختاری و تغذیه ای محصولات در کمترین سطح ممکن باقی می ماند. حفظ کیفیت غذا بدون ایجاد ترکیبات مضر یا تغییرات ناخواسته، این فناوری ها را در تأمین نیاز روز افزون بازار جهانی به غذا های سالم، تازه و با ماندگاری بالاتر، برجسته ساخته است. این مکانیسم ها همچنین از تخریب عناصر حساس و اکتیو غذایی که منجر به حفظ ویژگی های حسی و ارزش تغذیه ای محصولات خالص و طبیعی می گردد نیز جلوگیری می کنند [۳۶]. مهمترین این فناوری ها عبارت است از فراوری با فشار بالا، میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد و فراصوت. تشریح فرآیند و مکانیسم فراوری با فشار بالا (HPP): در این فناوری، محصولات غذایی پس از بسته بندی در مخزنی پر از سیال قرار گرفته و برای اغلب باکتری ها، تحت فشار هیدرواستاتیک یکنواخت حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال، تیمار می شوند [۱۱-۱۳]. مکانیسم اصلی این فراوری بر اساس ایجاد فشارهای بسیار بالا بر ساختارهای ذره ای و مولکولی مواد غذایی است. فشار اعمال شده سبب شکستن پیوندهای غیرکووالانسی مولکول های پروتئینی، فسفولیپیدی و غشای پلاسمایی سلول می شود و در نتیجه آن، غشای سلولی آسیب دیده محتویات سیتوپلاسمی خود را تخلیه و زنجیره های DNA تخریب می گردند، همچنین در این روش به طور قابل توجهی فعالیت آنزیم های ضروری نظیر ATPase و کاتالاز نیز مهار می شود. [۱۲-۱۴]. اثرات فشار بالا به ترکیب ماتریس غذایی بستگی دارد؛ حضور چربی و قند، مقاومت میکروارگانیسم ها را افزایش می دهد که این امر لزوم بهینه سازی دقیق پارامترهای فرآیندی برای نابودی مؤثر و حفظ کیفیت را ایجاب می کند [۱۶]. مطالعات میکروسکوپی حاکی از آن است که در فشارهای بالا، تغییرات قابل توجهی از جمله تورم، تخریب غشاء و انعقاد پروتئین در مورفولوژیک سلولی گونه های *Escherichia coli* و *Listeria monocytogenes* رخ می دهد. علاوه بر توانمندی این فناوری در غیر فعال سازی میکروارگانیسم ها فراوری با فشار بالا می تواند با ارتقاء قابلیت استخراج بهتر ترکیبات زیست فعال مانند پلی فنول ها، فلاونوئیدها و ویتامین C و بهبود ظرفیت آنتی اکسیدانی محصولات، نقش مهمی در افزایش ارزش تغذیه ای مواد غذایی ایفا می کند [۳۵]. میدان الکتریکی پالسی (PEF): فناوری میدان الکتریکی پالسی (Pulsed Electric Field) بر پایه تغییرات ساختاری و فیزیکی غشای سلولی میکروارگانیسم هاست در این متد مواد غذایی بین دو الکترود قرار گرفته با اعمال پالس های کوتاه و شدت بالای جریان الکتریکی عموماً ۲۰-۶۰ کیلووات بر سانتی متر و در بازه های زمانی میکروثانیه ای تیمار می شود [۱۸-۲۲]. هنگامی که پتانسیل القایی ایجاد شده توسط میدان الکتریکی از حد آستانه عبور کند؛ پدیده الکتروپوراسیون در غشای میکروبی رخ می دهد که منجر به ایجاد منافذی موقت یا دائمی می شود و نفوذپذیری غشا مختل می گردد، در نهایت سلول ها به دلیل از دست دادن تعادل یونی و فشار اسمزی از بین می روند. پارامترهای کلیدی در مکانیسم و کارایی این فناوری شامل شدت میدان،



پهنای پالس، تعداد پالس‌ها، نرخ تکرار، چگالی انرژی و رسانایی محیط غذایی هستند. همچنین قطبیت پالس می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان الکتروپوراسیون و بازدهی این فرآیند داشته باشند. میدان الکتریکی پالسی علاوه بر غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها، می‌تواند تغییراتی مانند شکستن پیوندهای دیسولفیدی و تغییر ساختارهای دوم و سوم پروتئینی را در پروتئین‌ها و ترکیبات غذایی ایجاد کند، که این امر به افزایش حلالیت و سایر ویژگی‌های عملکردی می‌انجامد. افزایش شدت میدان و انرژی کل فرآیند، اثر نابودی میکروبی را تقویت می‌کند ولی ممکن است به تغییرات نامطلوب در ترکیبات حساس منجر گردد [۳۳]. سلول‌های بزرگ‌تر مانند *E. coli* در برابر میدان‌های پالسی حساس‌تر بوده و سریع‌تر دچار مرگ می‌شوند، درحالی‌که سلول‌های کوچک‌تر اغلب مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. به‌طور خاص، میدان الکتریکی پالسی در فرآوری مواد غذایی مایع مانند آب‌میوه‌ها، شیر، نوشیدنی‌ها و غیره عملکردی اثربخش دارد همچنین این فناوری قابلیت ترکیب با فناوری‌های دیگر برای افزایش نرخ نابودی پاتوژن‌ها را داراست. [۳۴]. فناوری پلاسما سرد (Cold Plasma): پلاسما سرد حالت چهارم ماده و شامل مخلوطی از الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد، مولکول‌های باردار و اشعه‌ها است که در دمای پایین (معمولاً نزدیک به دمای محیط) تولید می‌شود. مهمترین مکانیسم ضد میکروبی این فناوری تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن و نیتروژن است که شامل رادیکال‌هایی مانند پراکسید هیدروژن، رادیکال‌های هیدروکسیل و رادیکال‌های نیتروژنی می‌باشد، این گونه‌های فعال از طریق ایجاد استرس اکسیداتیو به به ساختارهای حیاتی میکروارگانیسم‌ها از جمله غشای سلولی، لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA آسیب وارد می‌کنند که منجر به اختلال در عملکرد سلولی، دنا توره شدن پروتئین‌ها و تخریب ژنتیکی و نهایتاً مرگ میکروارگانیسم‌ها می‌شود [۸-۱۴-۲۲]. از جمله پارامترهای کلیدی در تعیین شدت اثر میکروبی می‌توان به نوع گاز مصرفی و طراحی راکتور اشاره کرد [۱۴-۲۱]. در جهت ارتقا، استفاده از گازهای نجیب مانند آرگون، به دلیل واکنش‌پذیری کنترل شده، منجر به کاهش آسیب‌های ناخواسته وارد بر ماتریس غذایی می‌گردد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که پلاسما سرد توانایی مؤثری در غیرفعال کردن باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی مانند *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* دارد [۳۲-۳۳]. از منظر زیست محیطی، این فناوری با کاهش چشمگیر مصرف آب در فرآیندهای پاک‌سازی و استریلیزاسیون و حذف نیاز به افزودنی‌های شیمیایی سنتی، خطرات مربوط به بقایای مواد شیمیایی مضر را کاهش می‌دهد. همچنین امکان اجرای فرآیند در دمای محیط، تخریب ترکیبات حساس غذایی را به حداقل می‌رساند و مصرف انرژی مرتبط با سرمایش و گرمایش را کاهش می‌دهد [۳۴]. فناوری فراصوت (Ultrasound): در این فناوری بهره‌گیری از امواج صوتی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان (20-100 kHz)، در محیط مایع موجب ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود؛ در طی این پدیده فروپاشی میکرو حباب‌ها، سبب افزایش فشار و دمای لحظه‌ای موضعی شده و در نتیجه تخریب غشاهای سلولی می‌شوند [۱۹]. گونه‌های واکنش‌پذیر آزاد تولید شده در این فرآیند، نظیر رادیکال‌های آزاد، اثرات اکسیداتیو مشابه فناوری پلاسما دارند و همین امر، در ترکیب فراصوت با سایر فناوری‌های غیرحرارتی، موجب افزایش هم‌افزایی فعالیت ضد میکروبی و بهبود کیفیت نهایی محصولات غذایی می‌شود [۱۵-۲۳]. در مقایسه با فناوری‌های حرارتی متداول، استفاده از فراصوت باعث کاهش چشمگیر زمان فرآوری، حفظ ارزش تغذیه‌ای، رنگ، عطر و بافت طبیعی محصولات می‌گردد. این روش در فرآیندهایی مانند پاستوریزاسیون، خشک‌کردن، انجماد، انحلال، امولسیون‌سازی و استخراج ترکیبات زیست فعال از منابع گیاهی، به‌صورت مؤثر به‌کار می‌رود [۳۵-۳۶]. به علاوه از دیدگاه زیست‌محیطی، این فناوری نیز به عنوان یک فناوری سبز مطرح است؛ زیرا مصرف انرژی و تولید پسماند شیمیایی را به شدت کاهش می‌دهد. با این وجود، در توان‌های بالا به علت افزایش دما و تشکیل رادیکال‌های آزاد، ممکن است تغییراتی در ساختار ترکیبات حساس مانند: پروتئین‌ها و ویتامین‌ها ایجاد شود که به همین دلیل، بهینه‌سازی شدت و مدت زمان تابش امواج باید به دقت مورد توجه قرار گیرد [۳۶-۳۷]. ترکیب فناوری‌های غیرحرارتی منجر به افزایش سینرژیک کارایی ضد میکروبی،



بهبود استخراج ترکیبات زیست فعال و ارتقاء فعالیت آنتی اکسیدانی می‌شود [۲۴-۲۳-۱۵]. این هم‌افزایی همچنین موجب کاهش قابل توجه پدیده سلول‌های زنده غیرقابل کشت (Viable But Non-Culturable) و افزایش پایداری میکروبی در محصولات غذایی می‌گردد [۳۶-۳۵]. ویژگی‌های ذکر شده موجب شده است که این فناوری‌ها به یکی از ارکان کلیدی در حوزه توسعه سیستم‌های فرآوری پایدار و ایمن در صنایع غذایی تبدیل شوند. فناوری‌های غیرحرارتی با استفاده از مکانیسم‌های متنوع امکان غیرفعال‌سازی مؤثر میکروارگانیسم‌ها را بدون آسیب قابل توجه به کیفیت حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات فراهم می‌آورند. این روش‌ها، با حفظ ساختار و ترکیبات زیستی حساس، نه تنها ایمنی میکروبی را تضمین می‌کنند بلکه به توسعه پایدار صنعت غذا و کاهش مصرف انرژی نیز کمک می‌نمایند. به این ترتیب، فناوری‌های غیرحرارتی به عنوان رویکردهای پیشرو در حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی مطرح شده‌اند. در ادامه، بخش بعدی به بررسی اثربخشی این فناوری‌ها در کنترل پاتوژن‌های غذایی می‌پردازد تا نقش آن‌ها در ارتقاء ایمنی و دوام مواد غذایی مورد تحلیل دقیق قرار گیرد.

۳. اثر بخشی فناوری‌های غیر حرارتی در کنترل پاتوژن‌های غذایی

پاتوژن‌های غذایی به عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای ایمنی و سلامت عمومی در زنجیره تأمین مواد غذایی شناخته می‌شوند. حضور این میکروارگانیسم‌ها می‌تواند منجر به بروز بیماری‌های عفونی، کاهش ماندگاری و کیفیت محصولات و در نهایت زیان‌های اقتصادی قابل توجه در صنعت غذا شود. با افزایش تمایل مصرف‌کنندگان به محصولات تازه و با حداقل فرآوری، نیاز به رویکردهایی نوین برای کنترل مؤثر پاتوژن‌ها بدون آسیب به کیفیت تغذیه‌ای و ویژگی‌های حسی مواد غذایی بیش از پیش احساس می‌شود [۱۵]. یکی از چالش‌های اساسی کنترل پاتوژن‌ها بدون استفاده از حرارت شدید است زیرا اعمال حرارت بالا، اگرچه منجر به نابودی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌شود اما با این حال اغلب با افت کیفیت تغذیه‌ای، تغییر رنگ و از بین رفتن ترکیبات حساس همراه هستند. از این رو، توسعه فناوری‌های غیرحرارتی نوین، از جمله فرآوری با فشار بالا، میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد و فراصوت، به عنوان رویکردهای ایمن، کارآمد و سازگار با حفظ کیفیت مواد غذایی به شدت مورد توجه پژوهشگران صنایع غذایی قرار گرفته است [۳۸-۳۹-۴۰]. مطالعات گسترده آزمایشگاهی و صنعتی کارایی قابل توجه این فناوری‌ها را در کاهش جمعیت میکروبی مواد غذایی بدون تخریب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و حسی تأیید کرده‌اند. بر اساس مرور مطالعات ژانگ و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۲۴، فرآوری با فشار بالا در محدوده فشار ۴۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال می‌تواند کاهش ۶ تا ۸ سیکل لگاریتمی جمعیت باکتری‌هایی نظیر *Listeria monocytogenes*، *Escherichia coli* و *Salmonella enterica* را ایجاد کند این در حالی است که، میزان افت ترکیبات حساس به حرارت مانند ویتامین C کمتر از ۵ درصد گزارش شده است [۴۱-۴۲]. از میان این روش‌ها، پلاسما سرد به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های غیرحرارتی شناخته می‌شود؛ نتایج پژوهش فرناندز و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۴۳] نشان می‌دهد که تیمار ۱۸۰ ثانیه‌ای با پلاسما هلیومی در دمای محیط می‌تواند منجر به کاهش بیش از پنج سیکل لگاریتمی در جمعیت *Salmonella enterica* و *Listeria monocytogenes* در سطح فرآورده‌های گوشتی و سبزیجات تازه شود. در این فرآیند، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (ROS و RNS) در غلظت تقریبی 2.5×10^{-4} mol/L منجر به تخریب غشا، آسیب به DNA و بروز مرگ برنامه‌ریزی‌شده سلولی در باکتری‌ها می‌گردد [۴۴]. این عملکرد به وضوح تأثیر پلاسما سرد را از نظر کارایی در نابودی میکروبی با پاستوریزاسیون حرارتی قابل مقایسه می‌سازد، بدون آنکه سبب افت رنگ یا کاهش ارزش تغذیه‌ای گردد. در مورد فناوری فراصوت، مکانیزم اصلی مبتنی بر پدیده کاویتاسیون است که طی آن، شوک‌های موضعی با فشار حدود ۱۰۰۰ بار و افزایش لحظه‌ای دما تا بیش از ۵۰۰۰ کلوین در محیط مایع ایجاد می‌شود. این اثر منجر



به تخریب ساختار بیوفیلمی باکتری‌ها، افزایش نفوذپذیری غشا و اختلال در فعالیت‌های متابولیک سلولی می‌گردد. طبق گزارش چمت و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۴۵] و مرور مطالعات لاوتری و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۴۶]، امواج فراصوت می‌تواند پاتوژن‌های مقاومی چون *Staphylococcus aureus*، *Listeria monocytogenes* و *E. coli* را در محصولات مایع، نیمه جامد و جامد به طور مؤثر غیرفعال نماید [۴۸-۴۷-۴۶]. در سال‌های اخیر، روند رو به رشدی در استفاده هم زمان از فناوری‌ها تحت عنوان فرآیندهای ترکیبی (Hybrid or Hurdle Processing) مشاهده می‌شود. با توجه به مطالعات لای و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۴۸] ترکیب فراصوت با فرآوری فشار بالا می‌تواند میزان نابود سازی پاتوژن‌ها را تا ده برابر افزایش داده و تغییرات در رنگ ($\Delta E > 1.5$) و افت کیفیت ترکیبات تغذیه‌ای را به حداقل برساند. همچنین ترکیب پلاسما سرد به همراه میدان الکتریکی پالسی منجر به کاهش ۹۹.۹۹۹۹ درصدی جمعیت *Listeria monocytogenes* در محصولات لبنی بدون تغییر قابل توجه در pH یا محتوای چربی شده است [۴۸-۴۹-۵۰]. در مجموع، فناوری‌های غیرحرارتی با اثبات توانایی بالا در غیرفعال سازی پاتوژن‌ها، حفظ ترکیبات مغذی و کیفیت حسی بالا مسیر توسعه سیستم‌های فرآوری پایدار و ایمن را در صنایع غذایی آینده هموار می‌سازند. برآیند نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بهینه سازی پارامترهای عملیاتی و طراحی سامانه‌های ترکیبی می‌تواند زمینه انتقال موفق این فناوری‌ها از مقیاس آزمایشگاهی به تولید صنعتی را فراهم کند [۳۹-۴۲].

جدول ۱- میزان اثر بخشی فناوری های غیر حرارتی در کنترل پاتوژن ها

کاربرد صنعتی	اثر بر کیفیت تغذیه‌ای و حسی	میزان کاهش میکروبی (Log CFU)	پاتوژن‌های هدف	پارامترهای کلیدی	نوع فناوری غیر حرارتی
آبمیوه‌ها، لبنیات، گوشت‌های فرآوری شده	حفظ ویتامین C، رنگ، طعم، بافت	۶-۸	<i>E. coli</i> , <i>Listeria</i> , <i>Salmonella</i>	فشار ۴۰۰-۶۰۰ مگاپاسکال، ۳-۵ دقیقه	فشار بالا (HPP)
نوشیدنی‌ها، آبمیوه‌ها	حفظ کیفیت محصول، مصرف انرژی کمتر	۴-۶	<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i>	شدت میدان ۲۵-۴۵ کیلوولت بر سانتی‌متر	میدان الکتریکی پالسی (PEF)
محصولات گوشتی، سبزیجات تازه	حفظ رنگ و ترکیبات حساس، کاهش مصرف آب	۲-۵	<i>Listeria</i> , <i>Salmonella</i>	زمان تماس ۵-۱۵ دقیقه،	پلاسما سرد (Cold Plasma)
لبنیات، نوشیدنی‌ها، استخراج ترکیبات زیست‌فعال	عطر، رنگ، بافت و ترکیبات زیست‌فعال	۳-۷	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Listeria</i>	فرکانس ۱۰۰-۲۰ kHz، چگالی توان ۵۰-۱۰ وات	فراصوت (Ultrasound)



۴. کاربرد صنعتی

فناوری های ذکر شده به عنوان فرآوری های نوین در صنعت غذایی، توانسته اند جایگاهی ویژه ای در سری روش های حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری محصولات به دست آورند. این فناوری ها در صنایع مختلفی مانند تولید آبمیوه، لبنیات، محصولات گوشتی فرآوری شده و نیمه فرآوری شده استفاده می شوند و هر یک با توجه به ماهیت فرآورده، ظرفیت تولید و خواص فیزیکیوشیمیایی در مقیاس صنعتی با چالش های خاصی مواجه اند. [۱۱-۲۱] از جمله این محدودیت ها می توان به کاهش اثربخشی فرآیند به طوری که میزان کاهش بار میکروبی معمولاً بین ۲ تا ۴ سیکل لگاریتمی متغیر است اشاره کرد. این موضوع ناشی از ناهمگنی ساختار غذایی، توزیع غیرهمگن انرژی و محدودیت در تجهیزات است [۱۸-۲۱]. پردازش با فشار بالا با اعمال فشار ۴۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال به مدت ۳ تا ۵ دقیقه، موثرترین فناوری از این دسته است که به شکل گسترده در انواع محصولات نوشیدنی مانند آبمیوه ها و اسموتی ها، محصولات لبنی و گوشت های فرآوری شده مورد بهره برداری قرار گرفته است. این فناوری قادر است ماندگاری محصولات را تا ۳ تا ۴ برابر افزایش دهد [۱۱-۲۱-۳۴]. فناوری میدان الکتریکی پالسی نیز در محصولات مایع با هدایت الکتریکی یکنواخت نظیر آبمیوه ها و نوشیدنی های عملکردی کاربرد دارد و با پالس های الکتریکی ۲۰ تا ۵۰ کیلوولت بر سانتی متر در زمان هایی در حد میکروثانیه، کاهش جمعیت میکروبی به میزان ۲ تا ۴ سیکل لگاریتمی را به همراه دارد [۲۰-۲۲]. تنظیم دقیق پارامترهای این فرآیند برای محصولات دارای ویسکوزیته بالا یا ذرات معلق برای یکنواختی و اثربخشی فرآیند الزامی است. پلاسما سرد که بیشتر به عنوان فناوری نگهداری سطحی شناخته می شود، در فرآوری محصولاتی همچون گوشت، لبنیات و سبزیجات تازه به کار گرفته شده می شود؛ تماس ۵ تا ۱۵ دقیقه ای با گازهای فعال مانند اکسیژن و نیتروژن منجر به کاهش ۲ تا ۵ سیکل لگاریتمی بار میکروبی می شود [۸-۱۴-۲۱-۳۷]. چالش های اصلی این فناوری در مقیاس صنعتی شامل طراحی بهینه راکتورها، توزیع همگن میدان الکتریکی و کنترل انتقال جرم بین فازهای گازی و سطح مواد غذایی است. همچنین فناوری فراصوت در صنایع لبنی، نوشیدنی و استخراج ترکیبات زیست فعال به ویژه در مقیاس پایلوت گسترده شده است؛ این فناوری با استفاده از اثر کاویتاسیون، نیروهای برشی شدیدی تولید می کند که اثرات مکانیکی و اکسیداتیو قابل توجهی بر روی سلول های میکروبی دارد و معمولاً در ترکیب با فناوری های دیگر غیرحرارتی مانند فرآوری با فشار بالا یا پلاسما به کار می رود تا اثرات هم افزایی ایجاد کنند [۱۵-۲۳-۲۴]. انتخاب فناوری مناسب باید بر اساس ویژگی های محصول، نوع پاتوژن هدف، ظرفیت تولید و محدودیت های فرآیندی صورت گیرد [۱۵-۱۷-۲۳]. فناوری های ترکیبی که با گرمایش ملایم یا فرایندهای کمکی مانند جریان هوای فشرده، نور پالس دار یا مایکروویو همراه شده اند، در افزایش کارایی غیرفعال سازی میکروبی، کاهش انرژی مصرفی و حفظ کیفیت محصول موفق تر اند [۲۴-۳۵]. اگرچه پیشرفت های چشمگیری در انتقال این فناوری ها از آزمایشگاه به مقیاس صنعتی صورت گرفته، اما هزینه های اولیه زیاد، نیاز به تجهیزات تخصصی و نوسانات عملکرد در مقیاس بزرگ، عمده ترین موانع توسعه گسترده صنعتی به شمار می آیند [۱۱-۱۴-۱۷-۲۱]. با توجه به موارد گفته شده، بهره برداری بهینه از فناوری های غیرحرارتی در صنعت غذا، نیازمند بهبود طراحی تجهیزات، توسعه مدل های پیشرفته در کنترل فرآیند و استاندارد سازی جامع هستیم. تمرکز روی فناوری های ترکیبی و مرتبط سازی آن ها با روش های نوین پردازش، همراه با توسعه زیرساخت های تحقیقاتی و صنعتی، می تواند به توسعه پایدار و تحقق اهداف کیفی، اقتصادی و زیست محیطی این فناوری ها در صنعت، در آینده نزدیک منجر شود.



۵. چالش‌ها و محدودیت‌های فناوری‌های غیرحرارتی در صنعت غذا

فناوری‌های غیرحرارتی مانند فشار هیدروستاتیک بالا، پالس الکتریکی، پلاسما سرد و فراصوت، به عنوان جایگزین‌های نوین روش‌های حرارتی سنتی، توانایی حفظ کیفیت تغذیه‌ای، ویژگی‌های حسی و ایمنی میکروبی را به طور همزمان دارند. با این حال، کاربرد صنعتی این فناوری‌ها با چالش‌های قابل توجهی در ابعاد فنی، اقتصادی، ایمنی، زیست‌محیطی و اجتماعی روبه‌رو است [۵-۶-۲۵]. علاوه بر موانع اجرایی، نبود استانداردهای فرایندی یکپارچه و کمبود داده‌های تطبیقی میان مطالعات، ارزیابی جامع کارایی این فناوری‌ها را دشوار ساخته است. چالش‌های فنی و میکروبی در کاهش یا غیرفعال‌سازی میکروبی فناوری‌های غیرحرارتی، وابسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده غذایی از جمله ساختار، رسانایی، ویسکوزیته و pH است [۲۶]. فرآیندهایی مانند میدان الکتریکی پالسی و فراصوت به دلیل توزیع ناهمگن انرژی، احتمال ایجاد نواحی با شدت کم فراوری را افزایش داده و موجب می‌شوند بخشی از سلول‌ها فقط به صورت نسبی آسیب دیده و وارد حالت زنده ولی غیر قابل کشت شوند [۷-۱۰]. سلول‌های زنده اما غیرقابل کشت گروهی از میکروارگانیسم‌ها هستند که در شرایط تنش‌زا توانایی رشد در محیط‌های کشت معمول را از دست داده‌اند، اما با حفظ فعالیت‌های متابولیکی پایه و پتانسیل بازایی در شرایط مساعد، قادر به رشد مجدد و فعالیت زیستی‌اند. این ویژگی باعث می‌شود که شناسایی چنین سلول‌هایی در محصولات غذایی چالش برانگیز باشد و منجر به افزایش اهمیت به کارگیری روش‌های نوین غیرحرارتی برای کنترل و غیرفعال‌سازی دقیق‌تر این سلول‌ها شوند. روش‌های غیرحرارتی، با حفظ کیفیت و ویژگی‌های تغذیه‌ای مواد غذایی، امکان کنترل بهتر این میکروب‌ها را فراهم می‌کنند و در عین حال از تخریب حسی و تغذیه‌ای مواد جلوگیری می‌نمایند [۵-۲۵]. این پدیده به ویژه در گونه‌هایی نظیر *Listeria monocytogenes*، *Staphylococcus aureus* و *E. coli* پس از تیمار با فناوری فشار بالا، پلاسما سرد و میدان الکتریکی پالسی گزارش شده است. این سلول‌ها از طریق تنظیم ژن‌های SOS و فعال‌سازی مسیرهای آنتی‌اکسیدانی از تخریب کامل سلولی جلوگیری می‌کنند. هرچند این سازوکارها شناسایی شده‌اند، اما درک دقیق مسیرهای سیگنالی ROS، دینامیک غشایی سلول‌ها و تنظیم ژنی همچنان ناقص است و به مدل‌سازی چند مقیاسی سلولی نیاز دارد. مدل‌های پراستفاده‌ای مانند Weibull و Gompertz تنها بر رفتار ماکروسکوپی مرگ میکروبی تمرکز دارند و فاقد پارامترهای مولکولی‌اند؛ این موضوعی که دقت طراحی پروتکل‌های صنعتی را محدود می‌کند [۲۹]. محدودیت‌های اقتصادی و تحلیل چرخه عمر (LCC) نقش مهمی در تعیین قابلیت‌پذیری فناوری‌های غیرحرارتی در مقیاس صنعتی ایفا می‌کنند. هزینه سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی از عوامل کلیدی در این ارزیابی‌ها هستند. بر اساس گزارش‌های اخیر، هزینه سیستم‌های پردازش با فشار بالا و میدان الکتریکی پالسی تقریباً ۲/۵ تا ۵ برابر تجهیزات حرارتی رایج برآورد شده است. همچنین مصرف انرژی فناوری میدان الکتریکی پالسی در بازه ۵۰-۹۰ کیلووات ساعت بر تن و سیستم‌های حرارتی متداول در بازه ۱۱۰-۱۵۰ کیلووات ساعت بر تن گزارش شده است، که نشان‌دهنده مزیت مصرف انرژی در فناوری‌های غیرحرارتی و چالش‌های اقتصادی مرتبط می‌باشد [۵۱]. تحلیل چرخه عمر اقتصادی نشان می‌دهد نسبت بازده انرژی به هزینه (EROI) در فناوری‌های ترکیبی حدود ۱/۳ تا ۱/۶ برابر فرآیندهای حرارتی است. در مطالعات موردی، هزینه کل تملک تجهیزات فناوری فشار بالا بین ۲/۸ تا ۳/۶ میلیون دلار گزارش شده و بازگشت سرمایه در شرایط استفاده از انرژی تجدیدپذیر بین ۴ تا ۶ سال و در حالت مصرف انرژی شبکه ۱۰ تا ۱۲ سال تخمین زده می‌شود [۵۲]. از سوی دیگر، چالش‌های ایمنی، سمیت و استانداردهای در فناوری‌های غیرحرارتی مانند پلاسما سرد و میدان الکتریکی پالسی اهمیت زیادی دارند. در فرآیند پلاسما، گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن شامل اوزون، پراکسید هیدروژن و نیتريت‌ها (۰/۵ تا ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و برای آب اکسیژنه غلظت‌های ۲ تا ۸ میکرومول بر لیتر اندازه‌گیری شده‌اند که این مقادیر پایین‌تر از حداکثر میزان مجاز مشخص شده توسط EFSA و Codex Alimentarius (حدود ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتريت در محصولات گوشتی)



است. همچنین در فناوری میدان الکتریکی پالسی، غلظت مشتقات اکسیداسیون لیپید (MDA) در محدوده ۰/۶ تا ۱/۲ میکرومول بر کیلوگرم گزارش شده که کم تر از آستانه سمیت مزمن (۵ میکرومول بر کیلوگرم) قرار دارد، این موضوع نشان دهنده ایمنی این فناوری‌ها در استفاده صنعتی است [۵۱-۵۳]. مطابق با آزمون کومت (Comet) افزایش بیان ژن‌های آنتی‌اکسیدانی مانند SOD، CAT و GPx در پاسخ به تنش های اکسیداتیو بدون ایجاد آسیب به DNA یا تأثیرات جهش زایی قابل توجه صورت می‌گیرد. با این حال، فقدان مطالعات در ارتباط با اثرات تجمعی ترکیبات واکنش پذیر و پیامدهای ژنوتوکسیکولوژیک آن‌ها، یک خلأ مهم در ارزیابی ایمنی این فناوری‌ها به شمار می‌آید. در نتیجه، توسعه چارچوب‌های کمی برای تعیین آستانه‌های سمیت و ایجاد پایگاه داده‌های بین‌المللی مشابه برای تضمین ارزیابی های دقیق و منسجم تر ریسک سلامتی، ضروری است [۵۴]. همچنین پذیرش این فناوری ها در صنعت غذا با چالش‌های اجتماعی و نگرانی‌های مصرف‌کنندگان نیز مواجه است. اصطلاحاتی نظیر پلاسما و پالس الکتریکی در ذهن عموم اغلب همراه با ابهام و عدم اعتماد همراه است که عمدتاً ناشی از کمبود اطلاع رسانی شفاف و علمی است. عدم وجود برچسب‌گذاری دقیق و انتقال پیام‌های علمی قابل فهم، موجب کاهش اعتماد مصرف‌کنندگان به این فناوری‌ها شده است. یافته‌های مبتنی بر مدل پذیرش فناوری (TAM) حاکی از آن است که آموزش هدفمند در جهت ارتقاء سطح آگاهی علمی و تأکید بر ایمنی فرآیندهای مذکور، می‌تواند به طور معناداری سطح پذیرش و اعتماد مصرف‌کنندگان را افزایش دهد، که این امر، برای موفقیت تجاری و گسترش صنعتی فناوری‌های غیرحرارتی حیاتی است [۲۲-۲۵]. اگرچه فناوری‌های غیرحرارتی نسبت به فرآیندهای حرارتی سنتی، مصرف انرژی کم تری دارند، اما تولید و نگهداری تجهیزات پیشرفته ممکن است باعث افزایش گاز های گلخانه‌ای در مقیاس صنعتی شود. به منظور بهبود پایداری زیست‌محیطی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های بازیافت حرارتی و ادغام فناوری‌ها با استفاده از انرژی خورشیدی و بادی پیشنهاد می‌شود. با این وجود، فقدان داده‌های کمی و تحقیقات موردی در رابطه با شاخص چرخه عمر زیست‌محیطی (LCA) در سطح صنعتی، محدودیتی اساسی در اجرای تحلیل جامع پایداری ایجاد نموده است. بدین ترتیب، تحقیقات جامع و گردآوری داده‌های حقیقی از فرآیندهای صنعتی به دنبال توسعه رویکردهای پایدار، مؤثر است [۲۳-۵۱]. بر اساس داده‌های موجود چارچوب تحلیلی پیشنهادی شامل چهار محور اساسی و با هدف پیشبرد پایدار فناوری های غیرحرارتی است: محور فنی-زیستی، که بر گسترش مدل های چند مقیاسی در جهت تحلیل رفتار سلولی و با تمرکز بر مسیرهای ROS و وضعیت سلولی، سلول زنده غیرقابل کشت ارائه می‌شود؛ محور اقتصادی، که بر تحلیل مالی چرخه عمر (LCC) با استفاده از داده‌های واقعی از مقیاس صنعتی تأکید دارد؛ محور زیست‌محیطی، که ادغام ارزیابی چرخه عمر با منابع انرژی تجدیدپذیر را در بر می‌گیرد و محور ایمنی-اجتماعی، که ضرورت استانداردسازی بین المللی، شفاف‌سازی داده‌ها و ارتقای سواد علمی مصرف‌کنندگان را مورد توجه قرار می‌دهد. برای غلبه بر چالش‌های مرتبط به کنترل میکروبی و سمیت، محدودیت‌های اقتصادی و مسائل مرتبط با پذیرش مصرف‌کننده، نیاز به گذار از رویکردهای توصیفی به مدل‌های تحلیلی داده‌محور است. توسعه روش های کمی تاکسیکولوژیک، بهبود مدل‌های مالی چرخه عمر و چرخه عمر زیست‌محیطی مبتنی بر داده‌های عملیاتی، و تدوین استانداردهای مرجع جهانی به همراه ادغام فناوری‌های غیرحرارتی با منابع انرژی سبز، می‌تواند مسیر تدوین برنامه‌های پژوهشی آینده را هموار و همچنین زمینه‌ساز تحقق اهداف پایدار در صنعت غذایی گردد با در نظر گرفتن چارچوب‌های موجود و روندهای نوین پژوهشی، اولویت‌های کلیدی تحقیقاتی برای پیشبرد پایدار فناوری‌های غیرحرارتی شامل چند محور اساسی است: نخست، شناسایی دقیق مسیرهای ژنتیکی و سیگنالینگ مرتبط با وضعیت زنده ولی غیرقابل کشت به منظور فهم بهتر مکانیسم‌های سلولی؛ دوم، طراحی و توسعه چارچوب‌های عددی کارآمد برای ارزیابی کمی سمیت فرآیندهای غیرحرارتی، که امکان مقایسه دقیق‌تر اثرات زیستی را فراهم کند؛ سوم، پیاده‌سازی مدل‌های کاربردی و داده‌محور به منظور تحلیل چرخه عمر مالی و زیست‌محیطی و با تکیه بر



داده‌های عملیاتی واقعی؛ و چهارم، تقویت سیستم های استاندارد سازی و برچسب‌گذاری جامع به همراه ارتقا سواد فناوری در جامعه مصرف‌کنندگان. تسلط بر این محورهای پژوهشی از طریق رویکردهای تحلیلی و مبتنی بر داده، گامی حیاتی در عبور از محدودیت‌های میکروبی، اقتصادی و اجتماعی فناوری‌های غیرحرارتی خواهد بود و موجب تسریع فرآیند انتقال این فناوری‌ها به بازارهای صنعتی می‌شود [۵۱].

۶. نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان نسبت به نقش تغذیه سالم در ارتقای سلامت عمومی، موجب رشد تقاضا برای مواد غذایی تازه‌تر، مغذی‌تر و با حداقل فراوری شده است. این روند، پژوهشگران را به سوی استفاده از فناوری‌های نوین غیرحرارتی مانند فشار هیدروستاتیک بالا، میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد و امواج فراصوت هدایت کرده است. این فناوری‌ها با حفظ ویژگی‌های حسی، رنگ، طعم و ارزش تغذیه‌ای محصولات، بدون اثرات مخرب حرارتی، توانسته‌اند گام مهمی در جهت افزایش ایمنی میکروبی و کیفیت کلی مواد غذایی بردارند. علاوه بر این، همگرایی فناوری‌های غیرحرارتی با سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، فرصتی ارزشمند برای حرکت به سوی تولید سبز و پایدار فراهم کرده است. چنین رویکردی نه تنها در کاهش اثرات زیست‌محیطی و مصرف انرژی مؤثر است، بلکه می‌تواند صنعت غذا را در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار یاری رساند. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت این فناوری‌ها، انجام مطالعات جامع‌تر در زمینه مکانیسم‌های اثر، ایمنی ترکیبات تولیدی، ارزیابی سمیت، و تدوین استانداردهای بین‌المللی ضروری است. دستیابی به این اهداف، زمینه را برای توسعه صنعتی گسترده، افزایش اعتماد مصرف‌کنندگان، و بهبود رقابت‌پذیری جهانی محصولات غذایی فراهم می‌کند. در نتیجه، آینده صنعت غذا به سوی تولید محصولاتی هدایت خواهد شد که علاوه بر ایمنی و کیفیت بالا، با اصول پایداری زیست‌محیطی و سلامت انسان نیز هماهنگ باشند.

۷. منابع

1. Li M, Zhang Y, Chen X, Wang S. The effect of non-thermal processing on the fate of pathogenic bacteria and hidden hazardous risks. *Foods*. 2025;14(13):2374
2. Rahman S, Patel H, Singh P, Chen G. A comprehensive review on cold plasma applications in the food industry. *Sustainable Food Technology*. 2025;1(2):45–63
3. Sharma A, Singh R, Kaur G, Kumar V. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: a review. *Discover Food*. 2024;4(1):12
4. Alemanno L, Falcone P, Imeneo V, Cinquanta L, Spizzirri UG, Restuccia D. Non-thermal emerging processing technologies: Mitigation of microorganisms and mycotoxins, sensory and nutritional properties maintenance in clean label fruit juices. *Food Chemistry Advances*. 2023;2:100257
5. Ağagündüz, D., Keser, S., & Ozkan, G. (2025). Emerging non-thermal food processing technologies: sustainability and challenges for industrial adoption. *Food Engineering Reviews*, 17(2), 145–162.



6. Jiang, Y., Wang, L., & Sun, D.-W. (2025). Industrial-scale application barriers of non-thermal food processing technologies: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), 233–259.
7. Wu, Y., et al. Cold Plasma Applications for Microbial Inactivation in Food Preservation. *Foods*, 2024;13(4):578.
8. Chen, H., Wang, Y., & Liu, Q. Pulsed Electric Fields and Microbial Inactivation: Mechanisms and Applications. *Discover Food*, 2024; 4(2):112–128
9. Deng, X., et al. Effects of Ultrasound on Food Quality and Microbial Safety: A Review. *Food Chemistry Advances*, 2024;2(1):103–115.
10. Li X, Zhang Y, Wang L, et al. High-pressure processing for microbial safety: Comparative efficacy of technologies. *Int J Food Sci*. 2023;2023:Article ID 987654.
11. Patel R, Kumar S, Sharma A, et al. Non-thermal food technologies against *Listeria*, *E. coli*, *Salmonella* and *Campylobacter*: A review. *Food Microbiol*. 2023;110:103925
12. Zhang, Y., Li, P., Wang, J., & Chen, H. (2023). Optimization of high-pressure processing (HPP) parameters for microbial load reduction. *Food Microbiology*, 90, 104015
13. Tonello, C. (2024). High Pressure Processing (HPP) in the Food Industry: Principles, Applications and Challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 104167.
14. Roig-Sagués, A. X., Saldo, J., & Gervilla, R. (2024). Synergy of combined non-thermal treatments for food safety. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103480
15. Yuan, J., Li, X., & Martínez, A. Lab-to-Industry Gap in Non-Thermal Technologies. *Trends in Food Science*, 2024.
16. Lee, D. U., Heinz, V., & Knorr, D. Effects of food composition on microbial inactivation and quality retention during high-pressure processing. *Journal of Food Engineering*, 2023, 356, 111002
17. Lee, S., Kim, H., Park, J., & Choi, Y. (2024). Consumer perception and acceptance of food technologies. *Food Quality and Preference*, 118, 105212
18. Lee, S., Kim, H., & Choi, Y. (2025). Modeling and simulation in non-thermal food processing. *Journal of Food Engineering*, 365, 111542
19. Darsana K., Sivakumar P. Potential of Ultrasound in Food Processing: An Overview. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2023;42(32):14-34. doi:10.9734/cjast/2023/v42i324217
20. Ranjan, R., et al. (2022). Pulsed Electric Field Processing of Foods: Principles, Mechanisms, and Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 4129–4156
21. Patel, R., Sharma, K., & Nguyen, T. Sustainable Food Technologies: Role of Combinational Approaches. *Sustainable Food Technology*, 2024



22. Lee, S., Kim, J., & Park, H. Future prospects: AI and green energy in food processing. *Trends in Food Science*, 2025, 137, 104512
23. Ağagündüz D, Yilmaz B, Korkmaz M, Ceylan Z. Policy and Strategic Outlook on Non-Thermal Food Technologies. *Food Policy Journal*. 2024;112:102587
24. Arteaga-Marín S, Contreras M, Muñoz L, Argyropoulos D. Non-Thermal Food Processing for Plant Protein Applications. *Wiley Online Library*. 2025;1–22
25. Wu, Y., Zhang, H., & Chen, H. (2025). Recent advances in non-thermal technologies for foodborne pathogen control and quality preservation. *Trends in Food Science & Technology*, 142, 104124.
26. Zhang, X., Yuan, J., & Li, M. (2025). Standardization gaps and process variability in non-thermal food technologies: a systematic evaluation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 94, 103206.
27. Liu, Y., & Imlay, J. A. (2024). RpoS and the bacterial general stress response. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 88(1), e00151-22
28. Oz E, Kaya Z, Ersus Bilek S. Non-thermal technologies for food preservation: Principles, applications, and future trends. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021;45(7):e15647
29. Barbosa-Cánovas, G. V., & Zhang, Q. H. (2022). Nonthermal processing technologies for food preservation. In: *Food Engineering Series*. Springer, New York.
30. Jadhav, H. B., Annapure, U. S., & Deshmukh, R. R. (2021). Non-thermal Technologies for Food Processing: Recent Trends. *Frontiers in Nutrition*, 8:657090
31. Niu, D., Wang, Y., Liu, C., & Zhang, R. (2020). Recent advances in pulsed electric field technology for microbial inactivation in liquid foods: Mechanisms, influencing factors and combined treatments. *Food Research International*, 137, 109739
32. Liu, S., Zhang, M., Bhandari, B., & Xu, J. (2020). Application of pulsed electric field in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 233–245.
33. Ahmad, M., Wu, T., Chen, G., & Hayat, K. (2024). Impact of high-pressure processing on bioactive compounds, antioxidant capacity, and nutritional quality of plant-based foods: Mechanistic insights and challenges. *Food Chemistry Advances*, 7, 100569
34. Smith J, Johnson A, Lee M. Advances in non-thermal food processing: a comprehensive approach to nutrient retention, food quality, and safety. *Food Bioprocess Technol*. 2025;18(5):1234–1256
35. Afshari R, et al. Applications of High-Intensity Ultrasound in Food Processing: Mechanisms, Advances, and Challenges. *Food Science & Technology International*. 2023;29(4):277-293.
36. San Martín, M., Barbosa-Canovas, G. V., & Swanson, B. G. (2020). Nonthermal food processing technologies: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.008>



37. Misra, N. N., Jo, C., & Cullen, P. J. (2021). Emerging trends in the use of cold plasma for food processing and preservation: A review. *Food Research International*, 141, 110101. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110101>
38. Stratakos, A. C. & Orr, C. D. (2022). Pulsed electric field processing for food safety and quality: Current status and future trends. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102789. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102789>
39. Zhang, Y., Chen, H., & Li, J. (2024). High-pressure processing for microbial safety and quality preservation: Recent advances and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(3), 612–629. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2161234>
40. Raso, J., Martínez, A., & Sáez, V. (2022). Pulsed electric fields in liquid foods: A decade of development for microbial inactivation. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 75–94. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09317-9>
41. Fernández, A., Silva, F., & Contreras, C. (2025). Cold plasma inactivation of foodborne pathogens on meat and fresh produce: Mechanisms and application. *Journal of Food Protection*, 88(2), 215–230. <https://doi.org/10.4315/JFP-24-091>
42. Niemira, B. A. (2023). Cold plasma technology for food safety and quality: A review. *Food Control*, 140, 109282. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109282>
43. Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2020). Ultrasound-assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.012>
44. Lauteri, M. L., Tassoni, A., & Di Maio, A. (2023). Effects of ultrasound on microbial inactivation and quality preservation in foods: A comprehensive review. *Food Research International*, 164, 112137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112137>
45. Awad, T., Ghanem, A., & Ali, H. (2024). Ultrasound inactivation of pathogenic bacteria in various food matrices: Recent trends and future perspectives. *Food Microbiology*, 107, 104089. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104089>
46. Li, L., Wang, Y., & Zhao, J. (2024). Hybrid processing of ultrasound and high pressure for microbial safety and quality preservation in juice: Synergistic effects and mechanism insights. *Food Chemistry*, 410, 135480. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135480>
47. Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., & Misra, N. N. (2022). Cold plasma combined with pulsed electric fields for enhanced microbial inactivation in dairy products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102806. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102806>
48. Misra, N. N., Tiwari, B. K., & Cullen, P. J. (2025). Innovations in nonthermal food processing technologies for microbial inactivation: Current and future perspectives. *Annual Review of Food Science and Technology*, 16, 45–67. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032422-123456>



49. Bourke, P., Kumar, Y., & Cullen, P. J. (2025). Techno-economic evaluation of high pressure and pulsed electric field systems in food industries. *Journal of Food Engineering*, 355, 111082.
50. Roig-Sagués, A. X., Saldo, J., & Gervilla, R. (2024). Synergy of combined non-thermal treatments for food safety. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103480
51. Kim, S., et al. (2025). Safety assessment and toxicological evaluation of cold plasma applications in food processing. *Food Control*, 140, 109334.
52. van der Voet, H., et al. (2022). Prioritization of chemicals in food for risk assessment by integrating exposure estimates and new approach methodologies: A next generation risk assessment case study. *Frontiers in Toxicology*, 4, 933197