

تحلیل انرژی و مقایسه ردپای کربن در فناوری‌های فرآیند فشار بالا (HPP)، میدان الکتریکی پالسی (PEF)، پلاسمای سرد اتمسفری (ACP) و اشعه فرابنفش (UV)

حسین جوینده^۱، فاطمه حسنی^{*۱}

گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان،
ملاثانی، ایران

hosjooy@yahoo.com

hsnyfatmh50@gmail.com

خلاصه

در عصر حاضر، تأمین امنیت غذایی همگام با کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و مدیریت مصرف انرژی، به چالشی اساسی در صنایع غذایی تبدیل شده است. روش‌های سنتی حرارتی اگرچه ایمنی میکروبی را تأمین می‌کنند، اما به دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تخریب ارزش تغذیه‌ای، با اهداف توسعه پایدار همخوانی ندارند. این مقاله مروری به بررسی و مقایسه عملکرد چهار فناوری نوین غیرحرارتی شامل فرآیند فشار بالا (HPP)، میدان الکتریکی پالسی (PEF)، پلاسمای سرد اتمسفری (ACP) و اشعه فرابنفش (UV) در راستای کاهش ردپای کربن و بهینه‌سازی انرژی می‌پردازد. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این فناوری‌ها ضمن حفظ کیفیت حسی و مغذی، ضایعات مواد غذایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که اگرچه فناوری HPP برترین عملکرد را در حفظ تازگی دارد، اما فناوری PEF به دلیل مصرف انرژی ویژه بسیار پایین و حداقل انتشار دی‌اکسید کربن، به‌عنوان کارآمدترین گزینه از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی شناخته می‌شود. درنهایت، گذار به سمت این فناوری‌های سبز، راهکاری ضروری برای کربن‌زدایی از زنجیره تأمین و دستیابی به تولید پاک محسوب می‌گردد.

کلمات کلیدی: فناوری‌های غیرحرارتی، مدیریت انرژی، ردپای کربن، توسعه پایدار، میدان الکتریکی پالسی (PEF)، فرآیند فشار بالا (HPP)، پلاسمای سرد اتمسفری (ACP)، ارزیابی چرخه حیات (LCA)

۱. مقدمه

در عصر حاضر، تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان، همزمان با رعایت اصول پایداری و حفظ محیط‌زیست، به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشری تبدیل شده است. صنایع غذایی به‌عنوان یکی از مصرف‌کنندگان عمده انرژی، سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد ردپای کربن دارند. روش‌های سنتی فرآوری، به‌ویژه پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون حرارتی، اگرچه ایمنی میکروبی را تضمین می‌کنند، اما به دلیل وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی و راندمان پایین مصرف انرژی، دیگر با اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی سازگار نیستند. علاوه بر جنبه‌های زیست‌محیطی،

فرآیندهای حرارتی شدید اغلب منجر به تخریب ترکیبات مغذی، ویتامین‌ها و ویژگی‌های حسی محصولات می‌شوند که این امر با تقاضای مصرف‌کنندگان مدرن برای غذاهای باکیفیت و تازه در تضاد است. از این‌رو، گذار از فناوری‌های حرارتی متداول به سمت فناوری‌های نوین و غیرحرارتی که مبتنی بر انرژی الکتریکی و فرآیندهای فیزیکی هستند، نه تنها یک ضرورت اقتصادی برای کاهش هزینه‌های انرژی است، بلکه گامی حیاتی در جهت کربن‌زدایی^۱ از زنجیره تأمین غذا محسوب می‌شود [۱،۲]. در راستای تحقق تولید پاک‌تر و مدیریت بهینه انرژی، چهار فناوری برجسته شامل فرآیند فشار بالا (HPP)، پلاسمای سرد اتمسفری (ACP)، میدان الکتریکی پالسی (PEF) و اشعه فرابنفش (UV) به‌عنوان جایگزین‌های امیدوارکننده در این زمینه مطرح شده‌اند. فناوری HPP که به‌عنوان پاستوریزاسیون سرد نیز شناخته می‌شود، با اعمال فشارهای بسیار بالا (تا ۶۰۰ مگاپاسکال) و بدون نیاز به حرارت‌دهی مستقیم، علاوه بر حفظ کیفیت تازگی محصول، به دلیل مصرف محدود انرژی الکتریکی و کاهش ضایعات مواد غذایی، به‌عنوان یک فناوری دوستدار محیط‌زیست شناخته می‌شود. فناوری ACP نیز به‌عنوان یک روش سبز و غیرحرارتی، با تولید گونه‌های واکنشگر و بدون باقی‌گذاشتن پسماندهای سمی، پتانسیل بالایی در استریلیزاسیون سطحی و تصفیه آب در صنایع غذایی دارد [۱،۳،۴]. همچنین، فناوری PEF با اعمال پالس‌های الکتریکی کوتاه‌مدت و ولتاژ بالا، موجب نفوذپذیری غشای سلولی میکروارگانیسم‌ها شده و ضمن حفظ ویژگی‌های تغذیه‌ای، مصرف انرژی را در مقایسه با روش‌های حرارتی به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. فناوری UV به‌ویژه با ظهور دیودهای ساطع‌کننده نور (UV-LED)، به‌عنوان یک راهکار کم‌هزینه و کارآمد برای غیرفعال‌سازی میکروبی در مایعات و سطوح مطرح شده است که می‌تواند تا ۳۹ درصد در مصرف انرژی نسبت به پاستوریزاسیون حرارتی صرفه‌جویی کند [۵-۸].

با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت انرژی و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، این مقاله مروری با هدف بررسی جامع و مقایسه‌ای این چهار فناوری نوین تدوین شده است. در این پژوهش، ضمن مرور مطالعات اخیر، به تحلیل دقیق عملکرد این سیستم‌ها در حذف ردپای کربن، میزان مصرف انرژی ویژه، هزینه‌های عملیاتی و کارایی آن‌ها در حفظ کیفیت محصولات غذایی پرداخته خواهد شد تا دورنمایی روشن برای انتخاب فناوری مناسب در صنعت غذا ترسیم گردد.

۲. فرآیند فشار بالا (HPP)

HPP یک فناوری غیرحرارتی پیشرفته در صنایع غذایی است که با اعمال فشار هیدرواستاتیک بسیار بالا (معمولاً بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال) از طریق آب به مواد غذایی بسته‌بندی‌شده در ظروف انعطاف‌پذیر عمل می‌کند. مکانیسم این روش بر پایه اصل ایزواستاتیک استوار است که فشار را به‌طور آبی و یکنواخت منتقل کرده و با تخریب غشای سلولی میکروارگانیسم‌های رویشی و غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها، ایمنی و ماندگاری محصول را بدون استفاده از حرارت یا نگهدارنده‌های شیمیایی تضمین می‌کند. این تکنولوژی به دلیل حفظ ترکیبات زیست‌فعال، ویتامین‌ها و ویژگی‌های حسی مانند طعم و بافت، محصولاتی با کیفیت بسیار بالاتر نسبت به پاستوریزاسیون حرارتی تولید می‌کند. از منظر پایداری و مدیریت انرژی، اگرچه HPP در مرحله فشرده‌سازی انرژی‌بر است، اما مطالعات چرخه عمر (LCA) نشان می‌دهند که این روش به دلیل حذف فرآیندهای حرارتی طولانی، کاهش قابل توجه ضایعات غذایی از طریق افزایش ماندگاری و امکان بازیافت آب مصرفی، می‌تواند ردپای کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری نسبت به روش‌های سنتی داشته باشد و مسیری به‌سوی تولیدات با "برچسب پاک" و دوستدار محیط زیست فراهم کند. اکنون به بررسی برخی مقالات جدید در این زمینه پرداخته می‌شود [۹-۱۲].

¹ Decarbonization

پیکارت-پالماد^۱ و همکاران او (۲۰۱۹) در بررسی فناوری‌های غیرحرارتی (HPP، PEF و غشایی)، بر توانایی این روش‌ها در حفظ کیفیت تغذیه‌ای و حسی غذا و کاهش ضایعات از طریق بازیافت آب و ترکیبات زیستی تأکید کردند. در این پژوهش، از نظر اقتصادی، هزینه پاستوریزاسیون آب‌پرتقال با روش HPP حدود ۰/۱۰۷ دلار بر لیتر برآورد شد که به مراتب بالاتر از روش حرارتی متداول (۰/۰۱۵ دلار بر لیتر) و میدان‌های الکتریکی پالسی (۰/۰۳۷ دلار بر لیتر) است. لذا، مطرح نمودند که این فناوری‌ها با حذف مراحل حرارتی شدید، پتانسیل بالایی برای کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری در آینده دارند [۱۳].

آتوونو^۲ و همکارانش (۲۰۲۰) با مقایسه کیفیت و اقتصاد انرژی در فرآوری آب‌پرتقال توسط روش‌های HPP، میکروویو و اهمیتک دریافتند که کیفیت محصول (ویتامین C و طعم) در تمام روش‌ها مشابه و مطلوب است. اگرچه، فناوری‌های برقی نوین کارآمدتر هستند، اما هزینه بالای برق شبکه باعث شد هزینه نهایی پردازش در روش HPP (حدود ۱۰/۷ سنت/لیتر) نسبت به روش حرارتی (۱/۵ سنت/لیتر) بسیار بالاتر باشد. با این حال، با افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه برق، انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش‌های نوین به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۲].

کاکاس^۳ و همکاران او (۲۰۲۰) با ارزیابی چرخه حیات (LCA) و هزینه‌یابی (LCC)، فناوری HPP را با روش حرارتی (برای آب‌پرتقال) و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده (برای ژامبون) مقایسه کردند که این بررسی نشان داد HPP کیفیت را بهتر حفظ کرده و ضایعات را کاهش می‌دهد. هزینه فرآوری هر کیلوگرم آب‌پرتقال با HPP حدود ۰/۱۸۵ یورو (در برابر ۰/۱۰۳ یورو روش حرارتی) بود، اما از نظر زیست‌محیطی، HPP با انتشار ۰/۲۵۲ کیلوگرم CO₂ معادل، عملکرد بهتری نسبت به روش حرارتی (۰/۳۰۳ کیلوگرم CO₂ معادل) داشت؛ همچنین در مورد ژامبون، HPP هم از نظر هزینه (۰/۲۶ در برابر ۰/۸۲ یورو/کیلوگرم) و هم محیط‌زیست برتر بود [۱۴].

پاینی^۴ و همکارانش (۲۰۲۳) با انجام LCA برای استریلیزاسیون گوجه‌فرنگی و هلو، دریافتند که گرمایش اهمیتک اگرچه کیفیت محصول را بهتر حفظ می‌کند، اما به دلیل وابستگی به شبکه برق با سوخت فسیلی، ردپای کربن بالاتری دارد. برای مثال در پردازش گوجه‌فرنگی، انتشار کربن در روش اهمی $10^{-2} \times 4/61$ کیلوگرم CO₂ معادل در برابر $10^{-2} \times 2/54$ در روش متداول بود؛ با این حال، آنالیز حساسیت نشان داد که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند پنل‌های خورشیدی) می‌تواند انتشار کربن روش اهمیتک را تا بیش از ۷۰ درصد کاهش دهد و آن را رقابت‌پذیر کند [۱۵].

ژو^۵ و همکاران او (۲۰۲۳) طی انجام مطالعه‌ای چرخه حیات تولید اتانول سوختی را از ۲۰ تن ضایعات غذایی در روز مورد بررسی قرار دادند. در این کار آن‌ها دریافتند که این فرآیند ضمن مدیریت پسماند، با بهره‌گیری از محصولات جانبی به پایداری انرژی کمک شایانی می‌کند. همچنین، نتایج کمی نشان دادند که با استفاده از محصولات جانبی، کل فرآیند دارای تراز انرژی مثبت شده و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) از مقدار مثبت $10^3 \times 1/07$ کیلوگرم CO₂ معادل به مقدار منفی $10^2 \times 5/30$ کیلوگرم CO₂ معادل کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده حذف کربن از محیط و سازگاری بالای زیست‌محیطی است [۱۶].

¹ Picart-Palmade

² Atuonwu

³ Cacace

⁴ Paini

⁵ Zhou

اسلامی^۱ و همکارانش (۲۰۲۴) با شبیه‌سازی پیوند آب-انرژی در کارخانه‌های فرآوری گوجه‌فرنگی در ایتالیا، نشان دادند که بهینه‌سازی خطوط تولید می‌تواند ضمن حفظ کیفیت، مصرف منابع و ضایعات را کاهش دهد. طبق محاسبات انجام‌شده در این مطالعه، تولید یک کیلوگرم گوجه‌فرنگی پوست‌کنده منجر به انتشار ۰/۰۸۳ کیلوگرم CO₂ معادل و پوره گوجه‌فرنگی ۰/۱۳۵ کیلوگرم CO₂ معادل می‌شود که با اعمال استراتژی‌های بهینه‌سازی (مانند بازیافت حرارت)، این مقادیر به ترتیب ۱۶ و ۱۹ درصد کاهش یافته و هزینه‌های عملیاتی نیز تقلیل می‌یابد [۱۷].

بشیری^۲ و همکاران او (۲۰۲۵) تولید آزمایشگاهی کیتوسان از ضایعات پوست میگو را با روش HPP و متداول مقایسه کردند. در این پژوهش آن‌ها دریافتند که روش HPP با افزایش راندمان استخراج، مصرف مواد شیمیایی و حجم ضایعات سمی را کاهش داد. همچنین، آنالیز LCA نشان داد که روش کمک‌گرفته از HPP دارای پتانسیل گرمایش جهانی ۰/۰۶۴ کیلوگرم CO₂ معادل به ازای هر گرم محصول است که ۶۴ درصد کمتر از روش متداول (۰/۱۷۷ کیلوگرم CO₂ معادل) می‌باشد و در دسته‌های سلامت انسان و منابع نیز اثرات مخرب کمتری دارد [۱۸].

۳. فناوری میدان الکتریکی پالسی (PEF)

روش PEF یک روش فرآوری غیرحرارتی پیشرفته است که با اعمال پالس‌های ولتاژ بالا (معمولاً ۲۰ تا ۸۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) در زمان‌های بسیار کوتاه (در حد میکروثانیه) به ماده غذایی قرار گرفته بین دو الکترود عمل می‌کند. مکانیسم اصلی این روش پدیده الکتروپوریشن^۳ یا نفوذپذیری الکتریکی است که با ایجاد منافذ در غشای سلولی، موجب غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها یا افزایش انتقال جرم برای استخراج ترکیبات می‌شود. این فناوری به دلیل عدم نیاز به حرارت‌دهی شدید، نه تنها کیفیت حسی و ترکیبات مغذی حساس به حرارت (مانند ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها) را حفظ می‌کند، بلکه در مقایسه با روش‌های حرارتی سنتی، بهره‌وری انرژی بسیار بالاتری دارد. مطالعات ارزیابی چرخه حیات (LCA) نشان می‌دهند که PEF با کاهش زمان فرآیند و حذف نیاز به سوخت‌های فسیلی برای تولید بخار، می‌تواند ردپای کربن را کاهش داده و مدیریت انرژی را در خطوط تولید، به‌ویژه در پاستوریزاسیون آب‌میوه‌ها و استخراج ترکیبات زیست‌فعال از ضایعات، بهینه‌سازی کند. اکنون به بررسی برخی مقالات جدید در این زمینه پرداخته می‌شود [۱۹-۲۱].

جارا-کوئیچادا^۴ و همکاران او (۲۰۲۴) استخراج پلی‌فنول‌های چای سبز با کمک PEF را بهینه‌سازی کردند که منجر به افزایش ۵۰ درصدی راندمان استخراج و حفظ ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد [۲۲]. آنالیز چرخه عمر (LCA) نشان داد که انتشار کربن در روش PEF بسیار ناچیز و برابر با ۰/۰۰۶ کیلوگرم CO₂ معادل است، درحالی‌که این مقدار برای روش‌های اولتراسوند و خیساندن به ترتیب ۰/۰۹۷ و ۰/۰۷۳ کیلوگرم CO₂ معادل گزارش شد که نشان‌دهنده برتری زیست‌محیطی مطلق PEF است [۲۲]. آستراین-ردین^۵ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ در مرور سیستم‌های گرمایش اهمی و Ohmic-PEF نشان دادند که این روش‌ها با گرمایش حجمی سریع، کیفیت مواد غذایی جامد را بهتر از روش‌های سنتی حفظ می‌کنند. با توجه به نتایج حاصل در این مطالعه آن‌ها مطرح نمودند که، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی، این سیستم‌ها پتانسیل صرفه‌جویی ۶۵ درصدی در مصرف انرژی و کاهش ۴۱ درصدی در انتشار CO₂ را نسبت به سیستم‌های پاستوریزاسیون مرسوم دارند که این موضوع توجیه اقتصادی بالایی ایجاد می‌کند [۲۳].

¹ Eslami

² Bashiri

³ Electroporation

⁴ Jara-Quijada

⁵ Astráin-Redín

ارشد^۱ و همکاران او در سال ۲۰۲۲ طی انجام پژوهشی یک الکتروپوراتور مقرون به صرفه را برای آب‌پرتقال طراحی کردند، که با موفقیت میکروب‌ها را کاهش داده و کیفیت (ویتامین C و رنگ) را حفظ کرد و ماندگاری را به ۹ روز رساند. این سیستم بسیار کم‌مصرف بود و انرژی مصرفی آن حدود ۱۰ کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شد که تقریباً نصف انرژی مورد نیاز برای پاستوریزاسیون حرارتی متداول (LTLT) است [۲۴].

دیموپولوس^۲ و همکارانش در سال (۲۰۲۵) از پیش تیمار PEF برای آگیری هلوهای سخت استفاده کردند که بازده آگیری را به ۷۰٪ افزایش داد و کیفیت آبمیوه را حفظ کرد. از نظر انرژی، PEF تنها به ۰/۶ کیلوژول بر کیلوگرم انرژی نیاز داشت، در حالی که بلانچینگ حرارتی سنتی نیازمند ۱۹۵ کیلوژول بر کیلوگرم بود؛ این اختلاف فاحش نشان‌دهنده کاهش چشمگیر هزینه انرژی و ردپای کربن در روش PEF است [۲۵].

پاپاس^۳ و همکاران او (۲۰۲۳) با استفاده از ارزیابی چرخه عمر (LCA) برای استخراج از برگ‌های مورینگا، نشان دادند که روش‌های PEF و میکروویو کمترین اثرات زیست‌محیطی را دارند. امتیاز زیست‌محیطی (Pt یا Eco-points) برای PEF برابر با ۲۶/۷ Pt محاسبه شد که بسیار کمتر از روش خیساندن سنتی با امتیاز ۵۷/۲ Pt بود، که عمدتاً به دلیل کاهش مصرف برق و راندمان بالاتر استخراج است [۲۶].

ریبک^۴ و همکارانش در انجام تحقیقی در سال ۲۰۲۱، تأثیر ترکیب PEF و اولتراسوند را بر خشک کردن انجمادی فلفل دلمه‌ای بررسی کردند. در این مطالعه آن‌ها دریافتند که این روش ترکیبی باعث بهبود بافت و کاهش زمان خشک کردن شد. در ضمن، این روش انتشار کربن را به ۵/۹ کیلوگرم CO₂ به ازای هر کیلوگرم محصول کاهش داد (در مقایسه با ۱۷/۳ کیلوگرم برای نمونه شاهد) و کل مصرف انرژی را به ۷/۵ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم رساند [۲۷].

لاندی^۵ و همکارانش (۲۰۲۵) با مقایسه پاستوریزاسیون PEF و حرارتی در آب‌پرتقال، نشان دادند که PEF ضمن حفظ بهتر کیفیت و ارزش غذایی (کاهش طعم پختگی)، مصرف آب را تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. این روش با کاهش حدود ۳۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای (کاهش انتشار کربن به ۵۳/۰ kgCO₂/h ~ و کاهش ۶۰ درصدی مصرف سوخت فسیلی، هزینه واحد تولید را نیز به ۰/۰۳۵ یورو در لیتر رسانده که اقتصادی‌تر از روش حرارتی است [۲۸].

آتاناسیادیس^۶ و همکاران او (۲۰۲۵) استخراج روغن کنجد با روش‌های سبز PEF و اولتراسوند را بهینه‌سازی کردند که منجر به حفظ عالی آنتی‌اکسیدان‌ها و پایداری اکسیداتیو (کیفیت بسیار بالاتر نسبت به سوکسله) و افزایش راندمان روغن‌گیری تا ۵۹ درصد (کاهش ضایعات) شد. اگرچه تحلیل دقیق هزینه دلاری ارائه نشد، اما این روش‌ها با مصرف انرژی ویژه پایین در مقیاس صنعتی (حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلوژول بر کیلوگرم برای PEF)، پتانسیل بالایی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و ردپای کربن نسبت به روش‌های سنتی انرژی‌بر دارند [۲۹].

۴. پلاسمای سرد اتمسفری (ACP)

¹ Arshad

² Dimopoulos

³ Pappas

⁴ Rybak

⁵ Landi

⁶ Athanasiadis

روش ACP به عنوان یک فناوری غیرحرارتی و نوین در صنایع غذایی، با اعمال میدان الکتریکی ولتاژ بالا به گازهای حامل (مانند هوا، نیتروژن یا گازهای نجیب) و یونیزاسیون آن‌ها، مجموعه‌ای از گونه‌های فعال شیمیایی (RONS)، رادیکال‌های آزاد و پرتوهای فرابنفش را در دمای محیط تولید می‌کند که مکانیسم اصلی آن تخریب دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها و اکسیداسیون آلاینده‌هاست. این فناوری سبز به دلیل عدم نیاز به حرارت‌دهی طولانی و حذف مواد شیمیایی خطرناک، نقش کلیدی در مدیریت بهینه انرژی ایفا می‌کند و در مقایسه با روش‌های حرارتی سنتی، مصرف انرژی و آب را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که منجر به کاهش ردپای کربن و اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود. علاوه بر این، ACP با حفظ ارزش غذایی و ویژگی‌های حسی محصولات، ضمن تضمین ایمنی غذا از طریق حذف پاتوژن‌ها، سموم قارچی و آفت‌کش‌ها، همسویی بالایی با اهداف توسعه پایدار (SDGs) از جمله دسترسی به انرژی پاک و تولید مسئولانه دارد [۳۰، ۳۱].

شارما^۱ و همکارانش (۲۰۲۵) با به کارگیری ترکیب پلاسما سرد فشار اتمسفری ولتاژ بالا (HVACP) و همبسته‌ی کیتولیکوساکارید-EGCG بر روی گوشت صدف‌های خونی، ضمن غیر فعال سازی مؤثر باکتری *V. parahaemolyticus* و افزایش عمر ماندگاری محصول تا ۹ روز که مستقیماً منجر به کاهش ضایعات می‌شود، این فناوری غیرحرارتی را به عنوان یک راهکار دوستدار محیط زیست و فاقد پسماند سمی معرفی کردند که از نظر کیفی دارای ردپای کربن و هزینه انرژی کمتری نسبت به روش‌های حرارتی مرسوم است [۴].

بانو^۲ و همکارانش (۲۰۲۵) با استفاده از پیش تیمار پلاسمای سرد و استخراج آنزیمی برای جداسازی جنیستئین^۳ از ادامامه (لوبیای سویا)، ضمن افزایش قابل توجه محتوای فنولی و حفظ کیفیت آنتی اکسیدانی پودر طی ۴۵ روز ذخیره سازی که مانع هدررفت مواد مغذی می‌شود، خشک کردن پاششی را به دلیل سرعت بالاتر به عنوان جایگزینی اقتصادی تر برای خشک کردن انجمادی معرفی کردند و خاطرنشان ساختند که ماهیت غیرحرارتی و عدم نیاز به حلال‌های شیمیایی در این روش، به صورت کیفی هزینه‌های عملیاتی و ردپای کربن فرآیند را کاهش می‌دهد [۳].

پیپلیا^۴ و همکاران او (۲۰۲۴) با مقایسه تأثیر پلاسمای سرد و تیمار حرارتی بر پایداری آب آناناس، گزارش دادند که پلاسما علاوه بر حفظ بهتر رنگ و ترکیبات زیست فعال نسبت به روش حرارتی، عمر ماندگاری محصول را در دمای ۵ درجه سانتی گراد به ۹۰ روز افزایش داده که نقش مهمی در کاهش ضایعات دارد. همچنین، این روش به عنوان یک فناوری کم مصرف انرژی شناخته می‌شود که با حذف نیاز به حرارت‌دهی بالا، به طور کیفی هزینه انرژی و انتشار کربن پایین تری نسبت به پاستوریزاسیون سنتی دارد [۳۲].

یو^۵ و همکارانش (۲۰۲۵) با بررسی اصلاح ساختاری پلی ساکاریدهای *Dendrobium officinale* توسط پلاسما سرد تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، نشان دادند که این روش با افزایش حلالیت از ۸۷/۵٪ به ۹۶/۳٪ و کاهش ویسکوزیته، کارایی محصول را در صنایع غذایی و دارویی بهبود می بخشد و به عنوان یک رویکرد "کم هزینه" و "با بازدهی بالا" معرفی می‌شود که با حذف نیاز به حلال‌های شیمیایی اضافی، آلودگی زیست محیطی را کاهش داده و فرآیندی سبز با ردپای کربن پایین محسوب می‌شود [۳۳].

¹ Sharma

² Bano

³ Genistein

⁴ Pipliya

⁵ Yu

ساعدی^۱ و همکاران او در سال ۲۰۲۴ با طراحی یک سیستم فعال سازی پلاسمای سرد تقویت شده با میکرو حباب (MB-CPA) مبتنی بر لوله های ونتوری برای تصفیه جریان آب، ضمن حذف مؤثر آلاینده های دارویی و میکروبی که امکان استفاده مجدد از آب را فراهم می کند، قابلیت راه اندازی این سیستم با پنل های خورشیدی را اثبات کردند. در این مطالعه، با توجه به نتایج حاصل آن ها مطرح نمودند که این طرح منجر به هزینه انرژی عملیاتی صفر (تأمین از شبکه) شده و آن را به یک راهکار کاملاً پایدار، اقتصادی و با رد پای کربن ناچیز تبدیل می کند [۳۴].

کلیس^۲ و همکارانش (۲۰۲۴) با مطالعه اثر انواع مختلف پلاسما سرد اتمسفری بر ویژگی های شراب های قرمز و سفید، دریافتند که این روش بدون تغییر منفی در کیفیت حسی، باعث افزایش ترکیبات فنولی و ایمنی محصول می شود و از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی، به عنوان یک فناوری سبز می تواند جایگزین نگهدارنده های شیمیایی مانند سولفیت ها شود که این امر هزینه های مربوط به افزودنی ها و اثرات مخرب زیست محیطی (رد پای کربن) تولید آن ها را کاهش می دهد [۳۵].

جون^۳ و همکاران او در سال (۲۰۲۵) طی انجام تحقیقی با به کارگیری پلاسما DBD الکترون شناور برای کاهش باکتری *Salmonella enteritidis* در سینه و پوست مرغ خام، ضمن کاهش بار میکروبی تا ۲/۹۸-لگاریتم بدون تأثیر منفی بر شاخص های تازگی که فساد و ضایعات را به تأخیر می اندازد، استفاده از دستگاه های ولتاژ پایین را به عنوان راهکاری "مقرون به صرفه" و ایمن تر نسبت به سیستم های ولتاژ بالا معرفی کردند که به صورت کیفی مصرف انرژی بهینه تر و رد پای کربن کمتری دارد [۳۶].

شن^۴ و همکارانش (۲۰۲۴) با بررسی اثر پیش تیمار پلاسمای سرد همراه با خشک کردن مادون قرمز دور بر روی ورقه های یام، نشان دادند که این روش ترکیبی، علاوه بر حفظ بهتر کیفیت رنگ و افزایش ۲۰/۵ درصدی ترکیبات زیست فعال، زمان خشک کردن را تا ۳۲ دقیقه کاهش داده و به طور کمی مصرف انرژی را ۸/۹٪ کم می کند که مستقیماً منجر به کاهش هزینه های عملیاتی و انتشار کربن در فرآیند خشک کردن می شود [۳۷].

دوبروین^۵ و همکاران او (۲۰۲۳) با اعمال تخلیه کرونا پلاسما اتمسفری بر مخمر *Saccharomyces cerevisiae*، نشان دادند که این روش در زمان های بسیار کوتاه (۴۵ تا ۲۴۰ ثانیه) باعث نابودی کامل مخمرها شده و با جلوگیری از فساد، ضایعات محصول را کاهش می دهد. همچنین مزیت اصلی این روش انجام فرآیند ضد عفونی "بدون نیاز به حرارت" است که به صورت کیفی نشان دهنده مصرف انرژی بسیار کمتر و رد پای کربن پایین تر نسبت به روش های حرارتی معمول در صنایع غذایی است [۳۸].

۵. روش اشعه فرابنفش (UV)

روش UV به ویژه در طیف UV-C (۲۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر)، یک فناوری غیر حرارتی است که با تخریب ساختار ژنتیکی (DNA/RNA) میکروارگانیسم ها از طریق ایجاد دایمرهای تیمین، مانع تکثیر آن ها شده و آن ها را غیرفعال می کند. در این روش، مواد غذایی مایع یا سطوح جامد به صورت پیوسته یا ناپیوسته در معرض تابش مستقیم منابع نوری مانند لامپ های بخار جیوه یا فناوری های نوین LED قرار می گیرند که بدون نیاز به افزودنی های شیمیایی یا ایجاد باقیمانده های سمی، ایمنی

¹ Saedi

² Klis

³ Jeon

⁴ Shen

⁵ Dubrovin

محصول را تضمین می‌کند. از دیدگاه پایداری و مدیریت انرژی، این تکنیک به دلیل حذف فرآیندهای انرژی بر گرمایش و سرمایش، مصرف انرژی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (برای نمونه حدود ۲۶ کیلوژول بر کیلوگرم در مقایسه با ۳۹۷ کیلوژول بر کیلوگرم در روش‌های حرارتی متداول). علاوه بر این، تکنولوژی UV با کاهش قابل توجه مصرف آب صنعتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین حفظ کیفیت حسی و ارزش تغذیه‌ای محصول، به‌عنوان یک راهکار سبز با ردپای کربن پایین برای چالش‌های زیست‌محیطی صنعت غذا شناخته می‌شود [۱۲،۳۹،۴۰].

فلورس گالگوس^۱ و همکاران او (۲۰۲۲) با مقایسه تابش پیوسته و پالسی UV-C LED بر روی گوجه‌فرنگی تازه نشان دادند که روش نور پالسی (حالت ۱) با دوره کاری متغیر، علاوه بر حفظ کیفیت ظاهری و عدم افزایش دمای سطح محصول، منجر به کاهش - لگاریتمی بار میکروبی (تا ۱/۰۸ در دوز ۲۵ mJ/cm²) شده و از نظر مصرف انرژی، این تکنیک توانست در مقایسه با روش‌های دیگر تا ۱۲ درصد در مصرف برق صرفه‌جویی کند که این موضوع مستقیماً بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و ردپای کربن فرآیند تأثیرگذار است [۴۱].

گادودیا^۲ و همکاران او (۲۰۲۴) با ساخت یک منبع نوری اکسایپلکس^۳ ۲۲۲ نانومتر بدون جیوه برای استریلیزاسیون شیر خام، گزارش دادند که این روش بدون تغییر در خواص فیزیکیوشیمیایی نظیر pH و چربی، زمان احیای متیلن بلو (MBRT) را تنها با ۲/۵ دقیقه تیمار به بیش از ۵ ساعت افزایش داده و با کاهش - لگاریتمی قابل توجه بار میکروبی (۲/۵۸) برای E. coli، ایمنی و ماندگاری شیر را بهبود می‌بخشد که این رویکرد به دلیل عدم استفاده از جیوه و کارایی در دمای پایین، گزینه‌ای دوستدار محیط‌زیست برای کاهش ضایعات شیر است [۴۲].

کامیلا^۴ و همکارانش (۲۰۲۴) در بررسی پاستوریزاسیون غیرحرارتی UV-C غذاهای مایع مانند آبمیوه و تخم مرغ مایع، اظهار داشتند که این فناوری با حفظ ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای و کاهش پاتوژن‌هایی مانند *Salmonella*، جایگزینی مناسب برای روش‌های حرارتی است که ضمن جلوگیری از تخریب حرارتی مواد مغذی، چالش‌های مربوط به مصرف بالای انرژی در پاستوریزاسیون سنتی را مرتفع می‌کند، اگرچه محدودیت‌هایی نظیر عمق نفوذ کم در مایعات کدر و هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه تجهیزات باید در مقیاس صنعتی مدیریت شود [۴۳].

مک آیزاک^۵ و همکاران او در سال ۲۰۲۳ با مقایسه عملکرد LED های ۲۸۰ نانومتری و لامپ‌های جیوه کم‌فشار در تصفیه آب، دریافتند که سیستم‌های LED با رسیدن به بازدهی دیواری ۲۰ درصد می‌توانند مصرف انرژی را تا ۴۳/۴ درصد نسبت به سیستم‌های سنتی کاهش دهند و برآورد کردند که جایگزینی این سیستم‌ها در تصفیه‌خانه‌های کانادا می‌تواند سالانه منجر به کاهش انتشار ۹۴۶ تن معادل دی‌اکسید کربن شود که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فناوری در کاهش ردپای کربن و هزینه‌های انرژی در صنایع مرتبط با آب است [۴۴].

چن^۶ و همکارانش (۲۰۲۴) با مقایسه روش‌های حرارتی و غیرحرارتی بر روی شیر کامل گاو، گزارش دادند که فرآیند فشار بالا (HPP) در ۴۰۰ مگاپاسکال بهترین گزینه برای حفظ پروتئین‌های ایمنی‌زا و کیفیت حسی است، درحالی‌که تابش UV-C به‌تنهایی باعث اکسیداسیون چربی و پروتئین (۵/۷۲ nmol/mg کربونیل) و ایجاد طعم نامطبوع می‌شود. بنابراین، ترکیب روش‌های غیرحرارتی با شرایط ملایم‌تر برای حفظ ارزش غذایی و کاهش ضایعات ناشی از فساد حرارتی توصیه می‌شود [۴۵].

لی^۷ و همکاران او در سال ۲۰۲۳ با طراحی یک سیستم هوشمند استریلیزاسیون UVC پالسی برای محصولات آبرزی خام، نشان دادند که این سامانه با تصمیم‌گیری خودکار شدت تابش، میزان فساد محصول را تا ۱۵ درصد کاهش داده و ضمن

¹ Flores Gallegos

² Gadodia

³ Exciplex

⁴ Kamilla

⁵ MacIsaac

⁶ Chen

⁷ Li



حفظ کیفیت، سود سالانه‌ای معادل ۲/۵۷ میلیون یوان ایجاد می‌کند که با در نظر گرفتن هزینه تولید ۱۶,۱۹۲ یوان در هر تن برای محصول جدید، این سیستم راهکاری اقتصادی با بازدهی بالا برای کاهش ضایعات و هزینه‌های نیروی انسانی در صنعت فرآوری غذاهای دریایی است [۸].

واهیتا^۱ و همکارانش (۲۰۲۵) با به‌کارگیری فناوری نوین UV-LED در طول موج ۲۵۴ نانومتر در یک سیستم جریان پیوسته برای غیر فعال‌سازی اسپوره‌های *Alicyclobacillus acidoterrestris* در آب گوجه‌فرنگی، موفق به کاهش - لگاریتمی بار میکروبی به میزان ۳ شدند که ضمن جلوگیری از فساد و کاهش ضایعات آب‌میوه، کیفیت آنتی‌اکسیدانی محصول را بهتر از روش‌های حرارتی حفظ کرد. این پژوهشگران تأکید کردند که فناوری اشعه ماوراء بنفش از نظر اقتصادی و انرژی بسیار کارآمدتر است، به‌طوری‌که این روش تنها حدود ۳۹ درصد از کل انرژی مصرفی در پاستوریزاسیون حرارتی متداول را مصرف می‌کند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن در کاهش هزینه‌های عملیاتی و صرفه‌جویی در انرژی است [۷].

۶. مقایسه عملکرد فناوری‌ها

^۱ Wahia

- **فناوری میدان الکتریکی پالسی (PEF):** این روش از نظر کارایی انرژی و هزینه پیشتر است. مطالعات نشان می‌دهند که PEF می‌تواند تا ۶۵٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. برای مثال، در آبگیری هلو، انرژی مورد نیاز PEF تنها ۰/۶ کیلوژول بر کیلوگرم بود، درحالی‌که روش حرارتی ۱۹۵ کیلوژول مصرف می‌کرد [۱۵]. از نظر زیست‌محیطی، این روش کمترین ردپای کربن را ثبت کرده است (به‌طور مثال ۰/۰۰۶ کیلوگرم CO₂ معادل برای استخراج چای سبز). همچنین هزینه عملیاتی آن (۰/۰۳۷ دلار/لیتر) بسیار کمتر از HPP و قابل رقابت با روش‌های حرارتی است [۲۲].
- **فناوری اشعه فرابنفش (UV-LED):** این فناوری به‌عنوان یک راهکار کم‌هزینه و کم‌مصرف شناخته می‌شود که می‌تواند تا ۳۹٪ نسبت به پاستوریزاسیون حرارتی در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند [۷]. جایگزینی لامپ‌های جیوه با LED، مصرف انرژی را بیش از ۴۳٪ کاهش می‌دهد. با این حال، کاربرد آن عمدتاً به مایعات شفاف و سطوح محدود می‌شود، زیرا نفوذپذیری کمی دارد و در دوزهای بالا ممکن است باعث اکسیداسیون چربی شود.
- **فناوری فرآیند فشار بالا (HPP):** در حفظ کیفیت و تازگی محصول بی‌رقیب است، اما از نظر مصرف انرژی و هزینه در جایگاه پایین‌تری نسبت به PEF و UV قرار می‌گیرد. هزینه فرآوری آن (۰/۱۰۷ دلار/لیتر) بسیار بالاتر از سایر روش‌هاست. اگرچه در مقیاس صنعتی راندمان انرژی آن بهبود می‌یابد (تا ۷۸٪)، اما همچنان فرآیند فشرده‌سازی انرژی‌بر است. با این حال، نسبت به روش‌های حرارتی گازسوز، ردپای کربن کمتری دارد.
- **فناوری پلاسمای سرد اتمسفری (ACP):** این روش به‌عنوان سبزترین فناوری برای حذف آلاینده‌ها و سموم بدون پسماند شیمیایی معرفی شده است. پتانسیل آن برای استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند هزینه عملیاتی را به صفر نزدیک کند. با این وجود، کاربرد آن بیشتر بر استریلیزاسیون سطحی و تصفیه متمرکز است تا فرآوری حجمی مواد غذایی.

۷. نتیجه‌گیری

مرور جامع مطالعات اخیر نشان می‌دهد که گذار از فرآیندهای حرارتی سنتی به سمت فناوری‌های نوین غیرحرارتی، نه تنها یک ضرورت تکنولوژیکی برای ارتقای کیفیت محصولات غذایی، بلکه راهکاری اجتناب‌ناپذیر جهت دستیابی به امنیت غذایی پایدار و مقابله با چالش‌های اقلیمی است. در مقایسه میان چهار فناوری بررسی شده، اگرچه فرآیند فشار بالا (HPP) به دلیل حفظ بی‌نظیر تازگی و ویژگی‌های حسی محصول و همچنین امکان کاهش ضایعات، جایگاه ویژه‌ای در تولید محصولات با ارزش افزوده بالا دارد، اما ماهیت فرآیند آن، که نیازمند فشرده‌سازی مکانیکی است، موجب شده تا از منظر راندمان مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی در جایگاهی پایین‌تر از روش‌های الکتریکی خالص قرار گیرد. از سوی دیگر، فناوری‌های اشعه فرابنفش (UV) و پلاسمای سرد (ACP) به‌عنوان راهکارهایی بسیار پاک و کم‌مصرف شناخته می‌شوند که با حذف آلاینده‌ها و کاهش چشمگیر نیاز به انرژی، عملکردی بسیار سبز از خود نشان می‌دهند، اما محدودیت نفوذپذیری آن‌ها عمدتاً کاربردهای آن را به مایعات شفاف و استریلیزاسیون سطحی محدود می‌سازد.

با در نظر گرفتن جمیع شاخص‌های پایداری، فناوری میدان الکتریکی پالسی (PEF) به‌عنوان برترین گزینه از منظر تعادل میان "کارایی انرژی" و "حفاظت از محیط‌زیست" جلوه می‌کند. این فناوری با ارائه کمترین میزان مصرف انرژی ویژه و حذف کامل نیاز به سوخت‌های فسیلی برای تولید حرارت، موفق شده است پایین‌ترین سطح ردپای کربن را در

میان روش‌های بررسی‌شده ثبت کند. برتری زیست‌محیطی مطلق PEF در کنار توجیه اقتصادی بالای آن ناشی از کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش راندمان استخراج، آن را به امیدوارکننده‌ترین جایگزین صنعتی برای کربن‌زدایی از زنجیره تأمین غذا تبدیل کرده است. بنابراین، می‌توان اذعان داشت که اگرچه انتخاب فناوری وابسته به نوع محصول است، اما برای دستیابی به اهداف کلان توسعه پایدار و تولید سبز با حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه و سرمایه‌گذاری بر روی فناوری PEF اولویت بالاتری دارد.

۸. مراجع

1. Sojecka, A.A., Drozd-Rzoska, A. and Rzoska, S.J. (2025), "Global Population, Carrying Capacity, and High-Quality, High-Pressure Processed Foods in the Industrial Revolution Era," *Sustainability*, **17**, pp 6827.
2. Atuonwu, J.C., Leadley, C., Bosman, A. and Tassou, S.A. (2020), "High-pressure processing, microwave, ohmic, and conventional thermal pasteurization: Quality aspects and energy economics," *J. Food Process Eng.*, **43**, pp e13328.
3. Bano, S., Sommano, S.R., Leksawasdi, N., Taesuwan, S., Rachtanapun, P., Techapun, C., Sumonsiri, N. and Khemacheewakul, J. (2025), "Innovative Cold Plasma Pretreatment and Enzyme-Assisted Extraction of Genistein from Edamame and Storage Stability of Dried Extract Powder," *Foods*, **14**, pp 2118.
4. Sharma, M.H., Singh, A., Singh, A., Benjakul, S., Palamae, S., Mittal, A. and Buatong, J. (2025), "Impact of Chitooligosaccharide Conjugated Epigallocatechin Gallate and Non-Thermal High-Voltage Atmospheric Cold Plasma on *Vibrio parahaemolyticus*: An In Vitro Study and the Use in Blood Clam Meat," *Foods*, **14**, pp 2577.
5. Hu, X., Wang, H., Hu, Y. and Tu, Z. (2024), "Insight into the effects of pulsed electric field on the structure, aggregation characteristics and functional properties of whey proteins," *Food Hydrocoll.*, **154**, pp 110111.
6. Swayne, M., Perumal, G., Padmanaban, D.B., Mariotti, D. and Brabazon, D. (2024), "Improved lifetime of a pulsed electric field (PEF) system-using laser induced surface oxidation," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **97**, pp 103789.
7. Wahia, H., Mustapha, A.T., Fakayode, O.A., Zhang, L., Zhou, C. and Dabbour, M. (2025), "Inactivating *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores with UVLED: Unraveling the role of turbidity, reactive oxygen species, and water dynamics," *Food Control*, **168**, pp 110941.
8. Li, Y., Zhang, L., He, Y., Zhang, X. and Liu, X. (2023), "Intelligent pulsed ultraviolet c radiation sterilization system: A cleaner solution of raw ready-to-eat aquatic products processing," *J. Clean. Prod.*, **427**, pp 139281.
9. Nurjati, S.K., Purnawan, M.A. and Stevviani, R. (2025), "High-Pressure Processing (HPP) Energy Efficiency and Scalability Challenges in Ultra-Processed Meat: A Review," *J. Clean Technol.*, **2**, pp 45–56.

11. Nabi, B.G., Mukhtar, K., Arshad, R.N., Radicetti, E., Tedeschi, P., Shahbaz, M.U., Walayat, N., Nawaz, A., Inam-Ur-Raheem, M. and Aadil, R.M. (2021), "High-pressure processing for sustainable food supply," *Sustainability*, **13**, pp 13908.
12. Lisboa, H.M., Pasquali, M.B., dos Anjos, A.I., Sarinho, A.M., de Melo, E.D., Andrade, R., Batista, L., Lima, J., Diniz, Y. and Barros, A. (2024), "Innovative and sustainable food preservation techniques: Enhancing food quality, safety, and environmental sustainability," *Sustainability*, **16**, pp 8223.
13. Picart-Palmade, L., Cunault, C., Chevalier-Lucia, D., Belleville, M.-P. and Marchesseau, S. (2019), "Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing," *Front. Nutr.*, **5**, pp 130.
14. Cacace, F., Bottani, E., Rizzi, A. and Vignali, G. (2020), "Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **60**, pp 102281.
15. Painsi, A., Romei, S., Stefanini, R. and Vignali, G. (2023), "Comparative life cycle assessment of ohmic and conventional heating for fruit and vegetable products: The role of the mix of energy sources," *J. Food Eng.*, **350**, pp 111489.
16. Zhou, J., Ma, H., Lv, P., Su, W., Wang, Q., Gao, M. and Qin, H. (2023), "Life Cycle Assessment of Fuel Ethanol Production from Food Waste in Consideration of By-Product Utilization," *Processes*, **11**, pp 1672.
17. Eslami, E., Abdurrahman, E., Pataro, G. and Ferrari, G. (2024), "Increasing sustainability in the tomato processing industry: environmental impact analysis and future development scenarios," *Front. Sustain. Food Syst.*, **8**, pp 1400274.
18. Bashiri, B., De Aguiar Saldanha Pinheiro, A.C., Tappi, S., Rocculi, P., Kaleda, A. and Vilu, R. (2025), "Life cycle assessment of laboratory-scale chitosan production: comparison of high-pressure processing-assisted and conventional methods," *Proc. Est. Acad. Sci.*, **74**, pp 1–14.
19. Yan, B., Li, J., Liang, Q.-C., Huang, Y., Cao, S.-L., Wang, L.-H. and Zeng, X.-A. (2025), "From laboratory to industry: The evolution and impact of pulsed electric field technology in food processing," *Food Rev. Int.*, **41**, pp 373–398.
20. Gao, X., Wang, Z., Sun, G., Zhao, Y., Tang, S., Zhu, H. and Li, Z. (2025), "Pulsed Electric Field (PEF) Technology for Preserving Fruits and Vegetables: Applications, Benefits, and Comparisons," *Food Rev. Int.*, pp 1–26.
21. Yang, M. and Wang, Q. (2025), "Carbon footprint and cost analysis of non-thermal food processing technologies: a review with a case study on orange juice," *Front. Sustain. Food Syst.*, **9**, pp 1585467.
22. Jara-Quijada, E., Pérez-Won, M., Tabilo-Munizaga, G., González-Cavieles, L., Palma-Acevedo, A., Herrera-Lavados, C. and Lemus-Mondaca, R. (2024), "Polyphenol extraction of green tea through pulsed electric field: yield improvement and environmental assessment," *Food Bioprocess Technol.*, **17**, pp 2718–2734.



23. Astrain-Redin, L., Ospina, S., Cebrián, G. and Álvarez-Lanzarote, I. (2024), "Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields," *Food Eng. Rev.*, **16**, pp 225–251.
24. Arshad, R.N., Abdul-Malek, Z., Jusoh, Y.M.M., Radicetti, E., Tedeschi, P., Mancinelli, R., Lorenzo, J.M. and Aadil, R.M. (2022), "Sustainable electroporator for continuous pasteurisation: Design and performance evaluation with orange juice," *Sustainability*, **14**, pp 1896.

25. Dimopoulos, G., Stoukogiorgos, G., Limnaios, A., Katsimichas, A., Thanou, I. and Taoukis, P. (2025), "Pulsed electric field pretreatment for energy efficient processing of industrial peach cultivars," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **100**, pp 103931.
26. Pappas, V.M., Samanidis, I., Stavropoulos, G., Athanasiadis, V., Chatzimitakos, T., Bozinou, E., Makris, D.P. and Lalas, S.I. (2023), "Analysis of five-extraction technologies' environmental impact on the polyphenols production from *Moringa oleifera* leaves using the life cycle assessment tool based on ISO 14040," *Sustainability*, **15**, pp 2328.
27. Rybak, K., Parniakov, O., Samborska, K., Wiktor, A., Witrowa-Rajchert, D. and Nowacka, M. (2021), "Energy and quality aspects of freeze-drying preceded by traditional and novel pre-treatment methods as exemplified by red bell pepper," *Sustainability*, **13**, pp 2035.
28. Landi, G., Benedetti, M., Sforzini, M., Eslami, E. and Pataro, G. (2025), "Comparative Analysis of Cost, Energy Efficiency, and Environmental Impact of Pulsed Electric Fields and Conventional Thermal Treatment with Integrated Heat Recovery for Fruit Juice Pasteurization," *Foods*, **14**, pp 2239.
29. Athanasiadis, V., Giannopoulou, M., Sarlami, G., Bozinou, E., Varagiannis, P. and Lalas, S.I. (2025), "Green Optimization of Sesame Seed Oil Extraction via Pulsed Electric Field and Ultrasound Bath: Yield, Antioxidant Activity, Oxidative Stability, and Functional Food Potential," *Foods*, **14**, pp 3653.
30. Lin, S.-P., Khumsupan, D., Chou, Y.-J., Hsieh, K.-C., Hsu, H.-Y., Ting, Y. and Cheng, K.-C. (2022), "Applications of atmospheric cold plasma in agricultural, medical, and bioprocessing industries," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **106**, pp 7737–7750.
31. Domonkos, M., Tichá, P., Trejbal, J. and Demo, P. (2021), "Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry," *Appl. Sci.*, **11**, pp 4809.
32. Pipliya, S., Kumar, S. and Srivastav, P.P. (2024), "Impact of cold plasma and thermal treatment on the storage stability and shelf-life of pineapple juice: A comprehensive postharvest quality assessment," *Food Phys.*, **1**, pp 100025.
33. Yu, W., Chen, P., Xu, X., Nie, L., Huang, Z., Muhammad, A.H., Wang, Y., Bu, T., Sun, P. and Cai, M. (2025), "Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on *Dendrobium officinale* polysaccharides: Physicochemical and functional properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, **311**, pp 143740.
34. Saedi, Z., Kuddushi, M., Gao, Y., Panchal, D., Zeng, B., Esfandiar Pour, S., Shi, H. and Zhang, X. (2024), "Stable and efficient microbubble-enhanced cold plasma activation for treatment of flowing water," *Sustain. Mater. Technol.*, **40**, pp e00887.

35. Klis, T., Pohl, P., Dzimitrowicz, A., Bielawska-Pohl, A., Caban, M., Cyganowski, P., Klimczak, A. and Jamroz, P. (2025), "Effect of cold atmospheric pressure plasmas on physicochemical, nutritional, and cytotoxic properties of red and white wines - comprehensive studies," *Food Res. Int.*, **221**, pp 117262.
36. Jeon, E.B., Choi, E.H., Lim, J.S. and Park, S.Y. (2025), "Application of non-thermal floating electrode-dielectric barrier discharge plasma for *Salmonella Enteritidis* reduction and quality assessment in chicken breasts and skin," *Poult. Sci.*, **104**, pp 105333.
37. Shen, C., Chen, W., Aziz, T., Khojah, E., Al-Asmari, F., Alamri, A.S., Alhomrani, M., Cui, H. and Lin, L. (2024), "Drying kinetics and moisture migration mechanism of yam slices by cold plasma pretreatment combined with far-infrared drying," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **95**, pp 103730.
38. Dubrovin, I.A., Emanuel, E., Lazra, Y. and Cahan, R. (2023), "Effects of Atmospheric Plasma Corona Discharge on *Saccharomyces cerevisiae*: Viability, Permeability, and Morphology," *Foods*, **12**, pp 381.
39. Vignali, G., Gozzi, M., Pelacci, M. and Stefanini, R. (2022), "Non-conventional stabilization for fruit and vegetable juices: overview, technological constraints, and energy cost comparison," *Food Bioprocess Technol.*, **15**, pp 1729–1747.
40. Ağagündüz, D., Ayakdaş, G., Katırcıoğlu, B. and Ozogul, F. (2025), "Advances in non-thermal food processing: a comprehensive approach to nutrient retention, food quality, and safety," *Sustain. Food Technol.*, **3**, pp 1284–1308.
41. Flores Gallegos, E., Escalante-García, N., Alanis-Lumbreras, D., Ivanov-Tsonchev, R., Lara-Herrera, A. and Olvera-Gonzalez, E. (2022), "Continuous and Pulsed Ultraviolet-C LED on Germicidal Effect and Energy Consumption in Fresh Products: Applications in Tomatoes as a Model," *Foods*, **11**, pp 3636.
42. Gadodia, V., Ahlawat, K., Jangra, R. and Prakash, R. (2024), "Potential use of DBD based 222 nm exciplex light source for milk sterilization and its comparative analysis with 253 nm UV-light and conventional pasteurization," *J. Food Meas. Charact.*, **18**, pp 7595–7606.
43. Kamilla, A.A., Mardhiyah, A., Visinanda, A. and Harjunowibowo, D. (2024), "Non-Thermal UV-C Pasteurization: An Effective Method for Microbial Reduction in Liquid Foods," *BIO Web Conf.*, pp 1044.
44. MacIsaac, S.A., Rauch, K.D., Prest, T., Simons, R.M., Gagnon, G.A. and Stoddart, A.K. (2023), "Improved disinfection performance for 280 nm LEDs over 254 nm low-pressure UV lamps in community wastewater," *Sci. Rep.*, **13**, pp 7576.
45. Chen, J., Zhang, J., Wang, N., Sun, X., Han, X., Yin, R., Pei, X., Liu, C., Pang, X. and Huang, F. (2024), "Comparative study on microbiological, physicochemical and nutritional properties of whole cow milk by thermal and non-thermal processing technologies," *Food Biosci.*, **59**, pp 104012.