استفاده از فناوری های نوین جهت بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی

امید میرزایی تاش [*1]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد ممقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ممقان، ایران
Email: dr.omidmirzaei@gmail.com

خلاصه

صنایع غذایی به‌عنوان یکی از بخش‌های پرمصرف انرژی، نقش مهمی در مصرف منابع انرژی و ایجاد اثرات زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. افزایش تقاضای جهانی برای محصولات غذایی و ضرورت کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار آلاینده‌ها، توجه به بهره‌وری انرژی در این صنعت را بیش از پیش ضروری ساخته است. هدف این مقاله بررسی جامع فناوری‌های نوین و رویکردهای هوشمند برای بهبود بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی است. در این راستا، الگوهای مصرف انرژی، سامانه‌های هوشمند پایش و مدیریت انرژی، فناوری‌های پیشرفته فرآوری حرارتی و غیرحرارتی، کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین و نقش داده‌های بزرگ در بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از سنسورها، اینترنت اشیا و سیستم‌های مدیریت انرژی امکان پایش لحظه‌ای مصرف انرژی، شناسایی نقاط هدررفت و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید را فراهم می‌کند. همچنین، فناوری‌های نوین فرآوری و الگوریتم‌های هوشمند قادرند مصرف انرژی را بدون افت کیفیت و ایمنی محصولات کاهش دهند. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به نیروی انسانی متخصص، کیفیت داده‌ها و سازگاری با زیرساخت‌های موجود، از موانع اصلی پیاده‌سازی این فناوری‌ها محسوب می‌شوند. در مجموع، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ادغام فناوری‌های دیجیتال، سامانه‌های مدیریت انرژی و روش‌های پیشرفته فرآوری می‌تواند مسیر دستیابی به صنایع غذایی پایدار، کم‌مصرف انرژی و سازگار با محیط‌زیست را هموار سازد.

کلمات کلیدی: انرژی، صنعت غذا، هوش مصنوعی، بهینه سازی مصرف انرژی

۱. مقدمه

صنایع غذایی یکی از بخش‌های کلیدی و پرمصرف انرژی در جهان است که سهم قابل‌توجهی در مصرف برق، سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. افزایش جمعیت و تقاضای جهانی برای محصولات غذایی فرآوری‌شده، فشار بر منابع انرژی و محیط زیست را تشدید کرده و ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی را بیش از پیش برجسته می‌کند (۱). بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع غذایی نه تنها از منظر اقتصادی اهمیت دارد، بلکه نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و توسعه پایدار ایفا می‌کند. مدیریت انرژی، به‌عنوان فرآیندی استراتژیک و نظام‌مند برای استفاده بهینه از انرژی، امکان افزایش سودآوری و ارتقای جایگاه رقابتی سازمان‌ها را فراهم می‌آورد. در این چارچوب، سیستم‌های مدیریت انرژی در صنایع غذایی به عنوان ابزارهایی کلیدی برای پایش، کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی عمل می‌کنند و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ملموسی ایجاد می‌کنند (۲, ۳). این سیستم‌ها با جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از خطوط تولید، تحلیل دقیق عملکرد انرژی و شناسایی فرصت‌های صرفه‌جویی، امکان تصمیم‌گیری علمی و عملیاتی را برای مدیران صنایع غذایی فراهم می‌کنند و می‌توانند هدررفت انرژی را به حداقل برسانند. علاوه بر مزایای آشکار اقتصادی و زیست‌محیطی، پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی با مجموعه‌ای از چالش‌ها مواجه است که شامل هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه برای نصب تجهیزات، پیچیدگی فرآیندهای عملیاتی و نیاز به آموزش مستمر کارکنان و مدیران است. این موانع می‌توانند مانع بهره‌برداری گسترده از سیستم‌های مدیریت انرژی شوند و مانع تحقق پتانسیل کامل آن‌ها گردند. با این حال، رفع این چالش‌ها و اتخاذ رویکردهای نوین مدیریتی و فناورانه می‌تواند امکان بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها را فراهم کند و اثرات مثبت آن‌ها را در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی به حداکثر برساند (۴, ۵). همزمان با توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی، فناوری‌های پیشرفته فرآوری و ابزارهای هوشمند نیز فرصت‌های قابل توجهی برای کاهش مصرف انرژی ارائه می‌دهند. فناوری‌های حرارتی و غیرحرارتی نوین، از جمله پردازش با فشار بالا، پالس الکتریکی، گرمایش اهمی، مایکروویو و پلاسمای سرد، می‌توانند فرآیندهای پرمصرف را بهینه کرده و میزان ضایعات حرارتی را کاهش دهند، بدون آنکه کیفیت، ایمنی یا ارزش تغذیه‌ای محصولات دچار افت شود. افزون بر این، کاربرد هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سامانه‌های پایش هوشمند، امکان پیش‌بینی مصرف انرژی، شناسایی الگوهای پنهان و اعمال کنترل‌های بهینه در زمان واقعی را فراهم می‌کند و به مدیران کمک می‌کند تصمیمات استراتژیک و عملیاتی موثرتری اتخاذ کنند (۶, ۷). استفاده همزمان از منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی، زیست‌توده و بیوگاز، همراه با بازیافت حرارت اتلافی، می‌تواند مسیر تحقق صنایع غذایی پایدار و کم‌مصرف انرژی را هموار سازد و کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های عملیاتی ایجاد کند. در مجموع، ترکیب سیستم‌های مدیریت انرژی پیشرفته، فناوری‌های فرآوری نوین، ابزارهای هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر، یک چارچوب جامع و پایدار برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع غذایی فراهم می‌آورد (۸-۱۰). هدف این مقاله ارائه یک بررسی جامع از فناوری‌های نوین و سیستم‌های مدیریت انرژی در صنایع غذایی است. در این راستا، الگوهای مصرف انرژی، فناوری‌های پیشرفته فرآوری، سامانه‌های هوشمند، کاربرد هوش مصنوعی و انرژی‌های تجدیدپذیر به تفصیل مورد تحلیل قرار گرفته و چالش‌ها، فرصت‌ها و روندهای آینده در این حوزه بررسی می‌شود تا بتوان راهکارهای عملی و علمی برای ارتقای بهره‌وری انرژی در صنایع غذایی ارائه کرد.

۲. الگوهای مصرف انرژی در صنایع غذایی

صنایع غذایی یکی از بخش‌های پرمصرف انرژی در صنایع است که سهم قابل توجهی در مصرف برق، سوخت‌های حرارتی و انرژی سرمایشی دارد. با توجه به رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای جهانی برای محصولات غذایی فرآوری‌شده، فشار بر منابع انرژی و زیرساخت‌های تولیدی افزایش یافته و اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی بیش از پیش برجسته می‌شود.

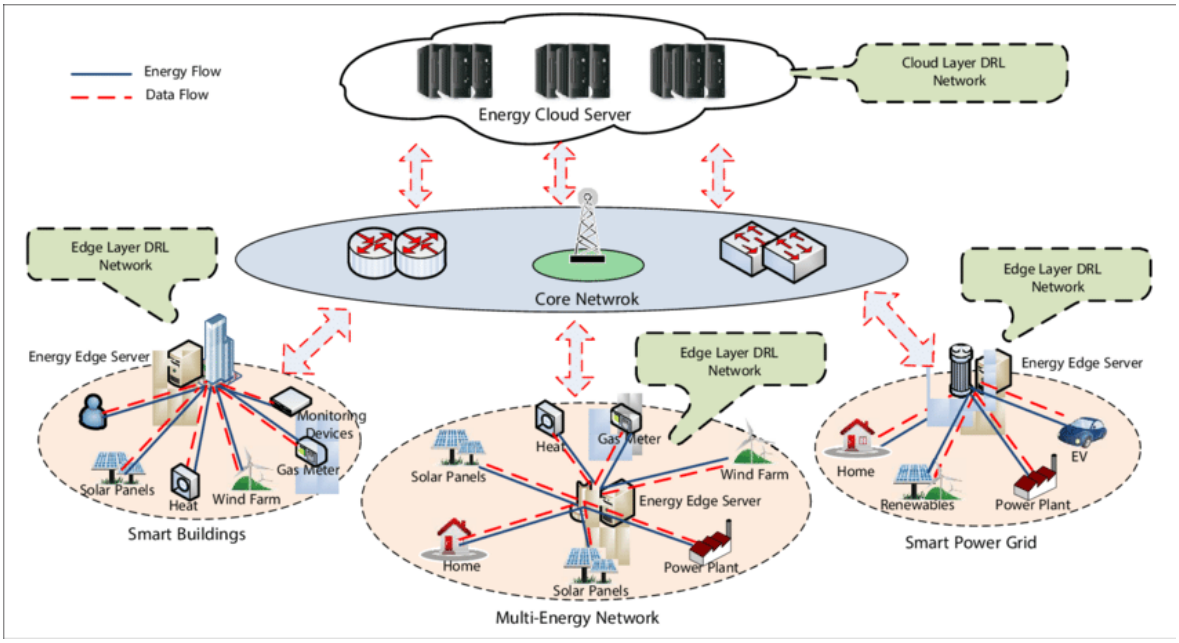
شناخت منابع اصلی مصرف انرژی و فرآیندهای پرمصرف، به عنوان گامی اساسی در مسیر افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی محسوب می‌شود و امکان شناسایی نقاط بهینه‌سازی را فراهم می‌کند (۱۱, ۱۲). مصرف انرژی در صنایع غذایی عمدتاً به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود; انرژی حرارتی، انرژی الکتریکی و انرژی سرمایشی .انرژی حرارتی بیشترین سهم از مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و در فرآیندهایی مانند پاستوریزاسیون، خشک‌کردن، پخت و حرارت‌دهی محصولات به کار گرفته می‌شود (۱۳). این انرژی بخش حیاتی فرآیندهای غذایی را تشکیل می‌دهد و بازده پایین آن می‌تواند موجب افزایش هزینه‌ها و اثرات منفی زیست‌محیطی شود. انرژی الکتریکی نیز برای تجهیزاتی مانند کمپرسورها، پمپ‌ها، موتورها، سیستم‌های مخلوط‌کن و خطوط انتقال مکانیکی و همچنین سیستم‌های روشنایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، انرژی سرمایشی به منظور حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات حساس به دما، به ویژه در صنایع لبنی، گوشتی و میوه و سبزیجات، به کار گرفته می‌شود و سهم قابل توجهی از مصرف کل انرژی کارخانه‌ها را شامل می‌شود (۱۴). برخی فرآیندها به دلیل شدت انرژی مصرفی، نقش برجسته‌ای در کل مصرف انرژی دارند. فرآیندهای حرارتی شامل پاستوریزاسیون و خشک‌کردن، فرآیندهای سرمایشی و انجماد و مراحل بسته‌بندی و فرآوری مکانیکی، از جمله پرمصرف‌ترین مراحل تولید هستند. این فرآیندها نه تنها بر هزینه‌های عملیاتی تأثیر مستقیم دارند، بلکه کیفیت نهایی محصول، ماندگاری، ایمنی غذایی و اثرات زیست‌محیطی کارخانه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۵). به همین دلیل، بهینه‌سازی مصرف انرژی در این فرآیندها نه تنها از منظر اقتصادی بلکه از لحاظ پایداری و کاهش اثرات محیطی اهمیت حیاتی دارد. چالش‌های اصلی در مدیریت انرژی در صنایع غذایی شامل پیچیدگی و تنوع فرآیندها، گستردگی محصولات تولیدی، کمبود سیستم‌های پایش دقیق و ابزارهای اندازه‌گیری انرژی، هزینه‌های سرمایه‌ای بالای تجهیزات کم‌مصرف و نیاز به آموزش و فرهنگ‌سازی مداوم در میان کارکنان و مدیران است. عدم توجه به این چالش‌ها می‌تواند بهره‌وری انرژی را محدود کرده و هزینه‌های عملیاتی و اثرات زیست‌محیطی را افزایش دهد (۱۴, ۱۶, ۱۷). با توجه به این موانع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند، ابزارهای پایش و بهینه‌سازی مبتنی بر داده و الگوریتم‌های هوشمند، به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، ترکیب فناوری‌های پیشرفته با انرژی‌های تجدیدپذیر و بازیافت حرارت اتلافی می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی در کارخانه‌ها، بهبود عملکرد عملیاتی و تحقق اهداف صنایع غذایی پایدار شود (۱۸). تحلیل دقیق الگوهای مصرف انرژی و شناسایی فرآیندهای پرمصرف، به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی راهکارهای بهینه‌سازی و تدوین سیاست‌های مدیریتی موثر، اهمیت ویژه‌ای دارد.

۳. سامانه‌های هوشمند پایش و مدیریت انرژی

با پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، صنایع غذایی به تدریج به سمت استفاده از سامانه‌های هوشمند پایش و مدیریت انرژی حرکت کرده‌اند. این سامانه‌ها به شرکت‌ها امکان می‌دهند مصرف انرژی خود را به‌صورت لحظه‌ای رصد کنند، نقاط هدررفت انرژی را شناسایی نمایند و فرآیندهای تولید را بهینه‌سازی کنند .سنسورها و اینترنت اشیا *(IoT) نقش حیاتی در این فرآیند ایفا می‌کنند؛ این فناوری‌ها با اندازه‌گیری و ثبت داده‌های دقیق از دما، فشار، جریان انرژی و عملکرد تجهیزات، اطلاعات جامعی از مصرف انرژی خطوط تولید فراهم می‌آورند. داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورها امکان تحلیل دقیق و شناسایی الگوهای مصرف انرژی در سطح کارخانه را فراهم می‌کند و مدیران را قادر می‌سازد تا تصمیمات عملیاتی و استراتژیک مبتنی بر داده اتخاذ کنند. در کنار سنسورها وIoT ، سیستم‌های مدیریت انرژی (EMS)†، چارچوبی یکپارچه برای پایش، کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی ارائه می‌دهند (17, 19). EMS ها با ترکیب داده‌های لحظه‌ای، الگوریتم‌های تحلیلی و کنترل‌های خودکار، امکان بهینه‌سازی فرآیندهای حرارتی، برودتی و مکانیکی را فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها می‌توانند با پیش‌بینی نیاز انرژی، کاهش اتلاف حرارت و برق و مدیریت بار مصرفی، بهره‌وری انرژی را به شکل قابل توجهی افزایش دهند. علاوه بر این، EMSها ابزارهای ارزشمندی برای گزارش‌دهی، تحلیل عملکرد و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی در صنایع غذایی فراهم می‌آورند(۱۷). یکی از پیشرفت‌های مهم در این حوزه، نقش داده‌های بزرگ در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. داده‌های جمع‌آوری شده از خطوط تولید، سنسورها، تجهیزات و سیستم‌های هوشمند، با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل داده و یادگیری ماشین، امکان شناسایی الگوهای پیچیده مصرف انرژی، نقاط بحرانی و فرصت‌های صرفه‌جویی را فراهم می‌آورد. این تحلیل‌ها به مدیران و مهندسان انرژی امکان می‌دهد تا فرآیندها را بهینه کرده، هزینه‌ها را کاهش دهند و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. ادغام سنسورها وIoT، EMS و تحلیل داده‌های بزرگ، یک زنجیره هوشمند مدیریت انرژی ایجاد می‌کند که قادر است به طور همزمان مصرف انرژی را پایش، تحلیل و بهینه‌سازی نماید. چنین سامانه‌ای می‌تواند به کاهش هدررفت انرژی، افزایش بهره‌وری عملیاتی و کاهش هزینه‌های تولید کمک کند و همزمان مسیر دستیابی به صنایع غذایی پایدار و کم‌مصرف انرژی را هموار سازد (۲۰). در این راستا مطالعاتی صورت گرفته که در ادامه بررسی می‌شود. هانیا و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی کاربرد IoT در صنعت فرآوری غذا می‌پردازد و پتانسیل این فناوری در بهبود پایداری، کاهش مصرف انرژی، پایش لحظه‌ای و خودکارسازی فرآیندها را تشریح می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از شبکه‌های حسگر و جریان داده‌های IoT می‌تواند منجر به کنترل هوشمندتر و بهینه‌سازی عملیات، بهبود بهره‌وری انرژی و عملکرد کلی در سامانه‌های تولید مواد غذایی شود (۲۰). سوبیرو و همکاران در سال ۲۰۲۵ بررسی کرده اند که چگونه فناوری‌های IoTمی‌توانند بهره‌وری انرژی را در تولید مواد غذایی افزایش دهند .این مطالعه به‌طور خاص نقش دستگاه‌های هوشمند و سنسورهای متصل را در پایش لحظه‌ای مصرف انرژی، شفافیت داده‌ها و بهبود دید کلی بر الگوهای مصرف انرژی در خطوط تولید ارزیابی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که به‌کارگیری شبکه‌های IoT در واحدهای تولیدی، امکان دسترسی به داده‌های انرژی در زمان واقعی را فراهم کرده و به مدیران کمک می‌کند تا با تحلیل این داده‌ها فرآیندها را بهینه‌سازی کرده و مصرف انرژی را کاهش دهند (۲۱). در مطالعه‌ای که توسط سیدوک و همکاران در سال ۲۰۲۵ انجام شد، نقش تحلیل داده‌های بزرگ در صنعت غذا مورد بررسی قرار گرفت، به‌طوری‌که این پژوهش کاربردهای این فناوری از جمله تحلیل داده‌های مصرف انرژی، پیش‌بینی الگوهای مصرف، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج بینش‌های راهبردی در بهینه‌سازی مصرف انرژی را تشریح می‌کند. نتایج این کار نشان می‌دهد که بهره‌گیری از حجم‌های عظیم داده می‌تواند به شناسایی الگوهای پنهان، بهبود عملکرد انرژی و اتخاذ تصمیمات عملیاتی هوشمند در فرآیندهای صنایع غذایی کمک کند و بدین ترتیب نقش محوری تحلیل داده‌های بزرگ در ارتقای بهره‌وری انرژی و پایداری سیستم‌های تولید

* Internet of Things (IOT)
†

غذایی برجسته می‌شود (۲۲). ادغام سنسورها، IoT، سیستم‌های مدیریت انرژی و تحلیل داده‌های بزرگ، امکان پایش، بهینه‌سازی و افزایش بهره‌وری انرژی در صنایع غذایی را به‌طور همزمان فراهم می‌کند.



۴ .فناوری‌های پیشرفته فرآوری جهت بهبود بهره‌وری انرژی

فناوری‌های پیشرفته فرآوری نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید در صنایع غذایی دارند . فناوری‌های حرارتی نوین مانند گرمایش اهمی، مایکروویو و امواج رادیوفرکانسی، امکان انتقال سریع‌تر و یکنواخت‌تر حرارت به محصول را فراهم می‌کنند و نسبت به روش‌های حرارتی سنتی، زمان فرآوری کوتاه‌تر و مصرف انرژی پایین‌تری دارند. این فناوری‌ها به ویژه در فرآیندهایی مانند پاستوریزاسیون، خشک‌کردن و پخت کاربرد دارند و با کاهش اتلاف حرارت و افزایش راندمان انتقال انرژی، بهره‌وری عملیاتی را افزایش می‌دهند. در کنار فناوری‌های حرارتی، فناوری‌های غیرحرارتی نیز به‌طور فزاینده‌ای برای بهبود بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲۳). پردازش با فشار بالا، پالس الکتریکی و پلاسمای سرد نمونه‌هایی از این فناوری‌ها هستند که بدون نیاز به افزایش دما، می‌توانند فعالیت میکروبی محصولات را کاهش دهند و ایمنی و کیفیت آن‌ها را حفظ کنند (۲۴, ۲۵). این روش‌ها نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند بلکه اثرات منفی حرارت بالا بر ارزش تغذیه‌ای و طعم محصولات را نیز به حداقل می‌رسانند (۲۶). مقایسه مصرف انرژی این روش‌ها با فرآیندهای سنتی نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین، چه حرارتی و چه غیرحرارتی، می‌توانند مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش دهند. به‌طور نمونه، استفاده از مایکروویو یا گرمایش اهمی در خشک‌کردن می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰–۵۰ درصد نسبت به روش‌های سنتی کاهش دهد، و فناوری پردازش با فشار بالا نیز امکان کاهش ۲۰–۴۰ درصدی مصرف انرژی در فرآوری مایعات و محصولات حساس به حرارت را فراهم می‌آورد. چنین پیشرفت‌هایی نشان‌دهنده پتانسیل بالای فناوری‌های پیشرفته فرآوری در بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و همزمان حفظ کیفیت و ایمنی محصولات غذایی است (۲۷, ۲۸) جدول ۱.

جدول ۱) مقایسه مصرف انرژی فناوری‌های پیشرفته فرآوری با روش‌های سنتی

منبع علمی	مقایسه با روش سنتی	مزایا در مصرف انرژی	نوع فناوری	فناوری/روش فرآوری
(۲۹)	مصرف انرژی بسیار کمتر نسبت به روش‌های حرارتی غیرمستقیم سنتی	انتقال سریع و یکنواخت انرژی، کاهش زمان فرآوری و اتلاف حرارت	حرارتی نوین	گرمایش اهمی (Ohmic Heating)
(۳۰)	نسبت به کوره‌های سنتی مصرف انرژی کمتر و بازده بالاتر	گرمادهی در حجم مواد، کاهش زمان و انرژی مصرفی	حرارتی نوین	مایکروویو
(۳۱)	کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای حرارتی نسبت به گرمادهی سطحی سنتی	نفوذ و گرمادهی سریع در مقایسه با انتقال حرارت از سطح	حرارتی نوین	امواج رادیوفرکانسی
(۱۸)	در برخی کاربردها انرژی اولیه بیشتر، اما در بلندمدت صرفه‌جویی به دلیل کاهش ضایعات	جلوگیری از اتلاف انرژی به دلیل حرارت‌دهی، حفظ کیفیت محصول	غیرحرارتی	پردازش با فشار بالا (HPP)
(۳۲)	مصرف انرژی پایین‌تر نسبت به فرآوری حرارتی صرف	کاهش نیاز به حرارت، انرژی کارآمد در برخی مواد	غیرحرارتی	پالس الکتریکی (PEF)
(۳۳)	معمولاً انرژی کمتری نسبت به فرآوری حرارتی دارد	عدم نیاز به حرارت بالا، مصرف انرژی کمتر در ضدعفونی/استریلیزاسیون	غیرحرارتی	پلاسمای سرد
(۳۴)	مصرف انرژی بالا، اتلاف انرژی بیشتر	فرآوری قابل اعتماد و گسترده	سنتی	روش‌های سنتی حرارتی (بویلر/اچ‌تی‌اس‌تی و غیره)

۵. کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین ابزارهای مؤثری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع غذایی محسوب می‌شوند، زیرا با تحلیل داده‌های لحظه‌ای خطوط تولید، مصرف انرژی و شرایط فرآوری، امکان پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی و شناسایی نقاط هدررفت فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها قادرند فرآیندها را به‌صورت هوشمند کنترل کنند، به گونه‌ای که کیفیت و ایمنی محصولات حفظ شده و مصرف انرژی کاهش یابد (۴). به‌عنوان مثال، در صنایع لبنی، شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی دما و زمان پاستوریزاسیون استفاده شده و مصرف انرژی را تا ۱۲ درصد کاهش داده‌اند، در حالی که کیفیت شیر تغییری نکرده است. همچنین در تولید نان و بیسکویت، الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند دمای پخت و زمان فرآیند را بهینه کنند و کاهش ۱۰–۱۵ درصدی مصرف انرژی را محقق سازند(35) . در صنایع فرآوری میوه و سبزیجات و نوشیدنی‌ها نیز مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی مصرف برق کمپرسورها و سیستم‌های سرمایشی را کاهش داده و همزمان عملکرد و کیفیت محصول را تضمین کرده‌اند. به طور کلی، ترکیب پایش لحظه‌ای داده‌ها، مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، امکان مدیریت جامع انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش پایداری محیطی در صنایع غذایی را فراهم می‌آورد (۳۶). یکی از مطالعات اخیر در زمینه استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای پیش‌بینی مصرف انرژی در صنایع غذایی توسط لی و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، که در آن مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی چندلایه و رگرسیون بردار پشتیبانی برای پیش‌بینی مصرف برق و گاز در یک کارخانه غذایی توسعه یافته‌اند. در این پژوهش، پس از شناسایی متغیرهای مؤثر، مدل‌ها آموزش داده شدند و نتایج نشان داد که شبکه عصبی چندلایه توانسته مصرف انرژی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند و بدین ترتیب بستر مناسبی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در چارچوب سیستم‌های مدیریت انرژی کارخانه فراهم نماید. استفاده از این مدل‌ها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری در واحدهای تولیدی کمک کند، زیرا پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی امکان برنامه‌ریزی و کنترل بهینه بار انرژی را فراهم می‌آورد (۳۷). در مطالعه‌ای که توسط راشوند و همکاران (۲۰۲۵) انجام شد، کاربرد یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی فرآیندهای غیرحرارتی در صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفت، به‌طوری‌که این پژوهش به تحلیل نقش این فناوری در تنظیم پارامترهای بهینه فرآیندهایی مانند فرآوری با فشار بالا، میدان پالس الکتریکی، پلاسمای سرد و اولتراسونیک پرداخته است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند پارامترهای عملیاتی این فناوری‌های نوین را به‌گونه‌ای تنظیم کند که مصرف انرژی کاهش یابد، ضایعات مواد غذایی به حداقل برسد و کیفیت محصول حفظ یا بهبود یابد، زیرا مدل‌های هوشمند قادر به تحلیل داده‌های پیچیده و تعیین شرایط بهینه تولید هستند که منجر به افزایش کارایی و پایداری در فرآیندهای غیرحرارتی می‌شود (۳۸). هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با پیش‌بینی مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرآیندها، نقش کلیدی در کاهش مصرف انرژی، بهبود کارایی و حفظ کیفیت محصولات غذایی ایفا می‌کنند.

۶. چالش ها و محدودیت ها

با وجود مزایای قابل توجه فناوری‌های نوین، سامانه‌های هوشمند و هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع غذایی، این فناوری‌ها با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی مواجه هستند که باید در نظر گرفته شوند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه برای خرید و نصب تجهیزات هوشمند، سنسورها، سیستم‌های اینترنت اشیا و نرم‌افزارهای تحلیل داده است؛ این مسئله به‌ویژه برای واحدهای تولیدی کوچک و متوسط می‌تواند مانع پیاده‌سازی گسترده فناوری‌های نوین شود. علاوه بر آن، بهره‌گیری مؤثر از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی، مستلزم وجود نیروی انسانی متخصص و آموزش‌دیده در زمینه تحلیل داده، برنامه‌نویسی و نگهداری سیستم‌های هوشمند

است، و کمبود این مهارت‌ها می‌تواند عملکرد سیستم‌ها را محدود کرده و موجب کاهش دقت پیش‌بینی‌ها شود. کیفیت و جامعیت داده‌های جمع‌آوری شده نیز از اهمیت بالایی برخوردار است؛ داده‌های ناقص، پراکنده یا نادرست می‌توانند به تحلیل‌های اشتباه، تصمیم‌گیری غیر بهینه و اتلاف منابع منجر شوند (۳۸). علاوه بر این، پیچیدگی فرآیندها و تنوع محصولات در صنایع غذایی باعث می‌شود توسعه مدل‌های عمومی برای همه خطوط تولید دشوار باشد و نیاز به تنظیم مدل‌ها و الگوریتم‌ها برای هر محصول یا فرآیند به صورت جداگانه احساس شود. برخی فناوری‌های غیرحرارتی و سنسورها ممکن است محدودیت‌های فنی و محیطی داشته باشند و برای مواد غذایی حساس به دما، رطوبت یا بافت‌های خاص نیازمند نگهداری و تعمیرات منظم باشند (۲۷, ۳۹). همزمان، استفاده از سیستم‌های اینترنت اشیا و جمع‌آوری داده‌های بزرگ با مسائل امنیت داده و حفاظت از اطلاعات همراه است و ممکن است کارخانه‌ها را در معرض تهدیدات سایبری قرار دهد. در نهایت، سازگاری با زیرساخت‌های موجود و تغییر فرآیندهای تولید سنتی نیز چالش مهم دیگری است، زیرا ادغام فناوری‌های نوین نیازمند تغییرات در سیستم‌های کنترل، تجهیزات و مدیریت انرژی موجود می‌باشد و بدون برنامه‌ریزی مناسب ممکن است موجب اختلال در تولید شود. بنابراین، برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل فناوری‌های هوشمند و سیستم‌های مدیریت انرژی در کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری صنایع غذایی، شناسایی، تحلیل و مدیریت این چالش‌ها و محدودیت‌ها ضروری است و تنها از طریق برنامه‌ریزی جامع، سرمایه‌گذاری هدفمند و آموزش مستمر می‌توان به دستیابی به صنایع غذایی پایدار و کم‌مصرف انرژی دست یافت (۴۰).

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای محصولات غذایی و فشارهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف بالای انرژی، بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع غذایی به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کارگیری سامانه‌های هوشمند پایش و مدیریت انرژی، فناوری‌های پیشرفته فرآوری و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و حفظ کیفیت و ایمنی محصولات غذایی ایفا کند. استفاده از سنسورها، اینترنت اشیا و سیستم‌های مدیریت انرژی امکان پایش لحظه‌ای مصرف انرژی و شناسایی نقاط هدررفت را فراهم می‌آورد، در حالی که فناوری‌های حرارتی و غیرحرارتی نوین با افزایش راندمان فرآوری و کاهش زمان عملیات، مصرف انرژی را نسبت به روش‌های سنتی کاهش می‌دهند. همچنین، کاربرد هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های بزرگ با فراهم‌سازی پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی و کنترل هوشمند فرآیندها، زمینه مدیریت بهینه منابع و کاهش هزینه‌های عملیاتی را مهیا می‌سازد. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به نیروی انسانی متخصص، کیفیت داده‌ها و سازگاری با زیرساخت‌های موجود همچنان وجود دارد که رفع آن‌ها نیازمند سیاست‌گذاری مناسب، سرمایه‌گذاری هدفمند و آموزش مستمر است. در مجموع، ادغام رویکردهای فناورانه و مدیریتی نوین می‌تواند مسیر دستیابی به صنایع غذایی پایدار، کم‌مصرف انرژی و سازگار با محیط‌زیست را هموار سازد و نقش مهمی در توسعه پایدار این صنعت ایفا کند.

منابع

1. Van DA, Ly BT, Hoang TTH. Energy, Fuel Consumption and Greenhouse Gas Emission in Food Processing Industry in Big Cities of Vietnam. JST: Engineering And Technology For Sustainable Development. 2025;35(2):33–9.
2. Sengar G, Saxena D. Introduction to Energy Efficiency in the Food industry. Energy Efficient Technologies for Food Safety, Quality, and Security: IGI Global Scientific Publishing; 2025. p. 1–16.
3. Tseng C-J, Chetthamrongchai P, Mahmudiono T, Sharma SK, Al-Awsi GRL, Abed SA, et al. Sustainability assessment of food industry with the approach of water, energy and food nexus. Food Science and Technology. 2022;42:e37922.
4. Khan MIH, Sablani SS, Nayak R, Gu Y. Machine learning- based modeling in food processing applications: State of the art. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2022;21(2):1409–38.
5. Linares G, Rojas ML. Ultrasound-assisted extraction of natural pigments from food processing by-products: a review. Frontiers in Nutrition. 2022;9:891462.
6. Delfiya DA, Prashob K, Murali S, Alfiya P, Samuel MP, Pandiselvam R. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Journal of Food Process Engineering. 2022;45(6):e13810.
7. Alvi T, Asif Z, Khan MKI. Clean label extraction of bioactive compounds from food waste through microwave-assisted extraction technique-A review. Food Bioscience. 2022;46:101580.
8. Steele EM, O'Connor LE, Juul F, Khandpur N, Baraldi LG, Monteiro CA, et al. Identifying and estimating ultraprocessed food intake in the US NHANES according to the Nova classification system of food processing. The Journal of nutrition. 2023;153(1):225–41.
9. Kumar S, Konwar J, Purkayastha MD, Kalita S, Mukherjee A, Dutta J. Current progress in valorization of food processing waste and by-products for pectin extraction. International Journal of Biological Macromolecules. 2023;239:124332.
10. Mehta N, S J, Kumar P, Verma AK, Umaraw P, Khatkar SK, et al. Ultrasound-assisted extraction and the encapsulation of bioactive components for food applications. Foods. 2022;11(19):2973.
11. Skawińska E, Zalewski RI. Combining the water–energy–food and food waste–food loss–food security nexuses to reduce resource waste. Energies. 2022;15(16):5866.
12. Su C, He Z, Li H. The effect of high-pressure homogenization on rabbit myofibrillar proteins in dilute sodium chloride solutions: weak ionic shielding promotes the depolymerisation. International Journal of Food Science and Technology. 2023;58(3):1138–49.
13. Lin B, Guan C, Policy E. Imported food consumption intention shifting during COVID-19: Turning a problem into an opportunity? 2021.
14. Pratap-Singh A, Noore S, Mandal R, Singh A. Sustainable processing through efficient use of energy and minimizing waste production. Nonthermal Processing in Agri-Food-Bio Sciences: Sustainability and Future Goals: Springer; 2022. p. 723–48.
15. Rudiansyah M. Jurnal-Sustainability assessment of food industry with the approach of water, energy and food nexus. 2022.

16. Ladha-Sabur A, Bakalis S, Fryer PJ, Lopez-Quiroga E. Mapping energy consumption in food manufacturing. Trends in food science & technology. 2019;86:270–80.
17. Dadhaneeya H, Nema PK, Arora VK. Internet of Things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: A review. Trends in Food Science & Technology. 2023;139:104109.
18. Almasi H, Jahanbakhsh Oskouie M, Saleh A. A review on techniques utilized for design of controlled release food active packaging. Critical reviews in food science and nutrition. 2021;61(15):2601–21.
19. Shrivastava V, Ali I, Marjub MM, Rene ER, Soto AMF. Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. Chemosphere. 2022;293:133553.
20. Ouafiq EM, Saadane R, Chehri A. Data management and integration of low power consumption embedded devices IoT for transforming smart agriculture into actionable knowledge. Agriculture. 2022;12(3):329.
21. Sobirov M. Analysis Of Increasing Energy Efficiency Through The Use Of IoT Technologies In Food Production. TLEP–International Journal of Multidiscipline. 2025;2(2):30–7.
22. Siddique A, Gupta A, Sawyer JT, Huang T-S, Morey A. Big data analytics in food industry: a state-of-the-art literature review. npj Science of Food. 2025;9(1):36.
23. Chakraborty D, Rana NP, Khorana S, Singu HB, Luthra S. Big data in food: Systematic literature review and future directions. Journal of Computer Information Systems. 2023;63(5):1243–63.
24. Rejeb A, Keogh JG, Rejeb K. Big data in the food supply chain: a literature review. Journal of Data, Information and Management. 2022;4(1):33–47.
25. Asgari A. Uncovering the role of big data analytics on the resilience of agri-food supply chains: a systematic literature review. Procedia Computer Science. 2025;253:1631–9.
26. Lorenc A, Czuba M, Szarata J. Big Data Analytics and Anomaly Prediction in the Cold Chain to Supply Chain Resilience. FME transactions. 2021;49(2).
27. Alahe MA, Wei L, Chang Y, Gummi SR, Kemeshi J, Yang X, et al. Cyber security in smart agriculture: Threat types, current status, and future trends. Computers and Electronics in Agriculture. 2024;226:109401.
28. Elragal A, Elgendy N. A data-driven decision-making readiness assessment model: The case of a Swedish food manufacturer. Decision Analytics Journal. 2024;10:100405.
29. Sarker A, Ahmmed R, Ahsan S, Rana J, Ghosh MK, Nandi R. A comprehensive review of food waste valorization for the sustainable management of global food waste. Sustainable Food Technology. 2024;2(1):48–69.
30. Chang K, Gunter MJ, Rauber F, Levy RB, Huybrechts I, Kliemann N, et al. Ultra-processed food consumption, cancer risk and cancer mortality: a large-scale prospective analysis within the UK Biobank. EClinicalMedicine. 2023;56.
31. Husainy AS, Sawant SM, Kale SK, Patil SD, Kumbhar SV, Patil VV, et al., editors. Investigation of power consumption of refrigeration model and its exploratory data analysis (EDA) by using machine learning (ML) algorithm. International Advanced Computing Conference; 2023: Springer.
32. Aliaño-González MJ, Barea-Sepúlveda M, Espada-Bellido E, Ferreiro-González M, López-Castillo JG, Palma M, et al. Ultrasound-assisted extraction of total phenolic compounds and antioxidant activity in mushrooms. Agronomy. 2022;12(8):1812.

33. Kim T-K, Cha JY, Yong HI, Jang HW, Jung S, Choi Y-S. Application of edible insects as novel protein sources and strategies for improving their processing. Food Science of Animal Resources. 2022;42(3):372.
34. El Assri N, Jallal MA, Chabaa S, Zeroual A. Enhancing building energy consumption prediction using LSTM, Kalman filter, and continuous wavelet transform. Scientific African. 2025;27:e02560.
35. Menichetti G, Ravandi B, Mozaffarian D, Barabási A-L. Machine learning prediction of the degree of food processing. Nature Communications. 2023;14(1):2312.
36. Ahmad S, Madhuri B, Gupta MK, Habib M. Active packaging materials. Biodegradable and Edible Food Packaging. 2024:345–61.
37. Lee H, Kim D, Gu J-H. Prediction of food factory energy consumption using MLP and SVR algorithms. Energies. 2023;16(3):1550.
38. Rashvand M, Dehkharghanian N, Nikzadfar M, Javed T, Luke LP, O'Brien A, et al. Machine Learning-Driven Optimization for Digital Transformation in Non-thermal Food Processing. Food and Bioprocess Technology. 2025:1–34.
39. Lin Y, Ma J, Wang Q, Sun D-W. Applications of machine learning techniques for enhancing nondestructive food quality and safety detection. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023;63(12):1649–69.
40. Zatsu V, Shine AE, Tharakan JM, Peter D, Ranganathan TV, Alotaibi SS, et al. Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence-a review. Food Chemistry: X. 2024;24:101867.