



مدیریت انرژی هوشمند در صنایع غذایی با استفاده از کنترل پیش‌بین اقتصادی مبتنی بر هوش مصنوعی

سیده سارا رضوی تهرانی^۱، سپیده لهراسبی نجاد^۲.

۱- سیده سارا رضوی تهرانی sarah.razavi.t@gmail.com

۲- سپیده لهراسبی نجاد sepidehlohrasbi72@gmail.com

خلاصه

صنایع غذایی به دلیل اتکای گسترده به فرآیندهای حرارتی، تبرید صنعتی و تجهیزات موتوری، از جمله صنایع انرژی‌بر محسوب می‌شوند. هم‌زمان، الزامات سخت‌گیرانه ایمنی و کیفیت محصول، امکان اعمال بسیاری از راهکارهای متداول کاهش مصرف انرژی را محدود می‌کند. اگرچه استاندارد ISO 50001 چارچوبی ساختاریافته برای مدیریت انرژی ارائه می‌دهد، اما در عمل پیاده‌سازی آن در صنایع غذایی اغلب به پایش و گزارش‌دهی محدود شده و کمتر به کنترل فعال و بهینه‌سازی بلادرنگ مصرف انرژی منجر شده است.

این مقاله مروری با هدف پر کردن این شکاف، به بررسی جامع سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر کنترل پیش‌بین اقتصادی (Economic Model Predictive Control – EMPC) و هوش مصنوعی در صنایع غذایی می‌پردازد. در این مقاله، ابتدا ویژگی‌های مصرف انرژی در صنایع غذایی مرور می‌شود، سپس چارچوب مفهومی سامانه پیشنهادی شامل لایه‌های فرآیندی، پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، بهینه‌سازی EMPC و همسوسازی با ISO 50001 ارائه می‌گردد. در ادامه، کاربردهای این رویکرد در واحدهای اصلی صنایع غذایی به‌صورت تحلیلی بررسی شده و در نهایت چالش‌ها و مسیرهای آینده پژوهش جمع‌بندی می‌شود.

کلمات کلیدی: مدیریت انرژی، صنایع غذایی، کنترل پیش‌بین اقتصادی، هوش مصنوعی، تبرید صنعتی.

۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی انرژی، نوسانات قیمت حامل‌های انرژی و تشدید سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت بهینه انرژی را به یکی از چالش‌های راهبردی بخش صنعت تبدیل کرده است. صنایع غذایی سهم قابل‌توجهی از مصرف نهایی انرژی صنعتی را به خود اختصاص می‌دهند که بخش عمده آن مربوط به فرآیندهای حرارتی، تبرید صنعتی و تجهیزات موتوری است [۱، ۲].

مدیریت انرژی در صنایع غذایی به‌طور ذاتی پیچیده‌تر از بسیاری از صنایع دیگر است. الزام به حفظ ایمنی میکروبی و کیفیت محصول، کنترل دقیق دما و زمان فرآیند را ضروری می‌سازد. علاوه بر این، تنوع بالای محصولات، تغییرپذیری برنامه تولید، عملیات شست‌وشو و ضدعفونی (CIP/SIP) و نوسانات بار، الگوی مصرف انرژی را پویا و غیرخطی می‌کند [۳، ۴]. در چنین شرایطی، بسیاری از راهکارهای مرسوم صرفه‌جویی انرژی یا قابل استفاده نیستند یا با ریسک‌های کیفی و ایمنی همراهند [۵، ۶].

استاندارد ISO 50001 به عنوان یک چارچوب بین المللی برای استقرار سیستم مدیریت انرژی (EnMS) معرفی شده است [۷]. با این حال، مطالعات نشان می دهند که در صنایع غذایی، پیاده سازی این استاندارد غالباً به سطح پایش، مستندسازی و اقدامات اصلاحی دستی محدود شده و کمتر به کنترل فعال و بلادرنگ مصرف انرژی منجر شده است [۷]. این مسئله نشان دهنده وجود یک شکاف اساسی میان «مدیریت انرژی مبتنی بر داده» و «کنترل عملیاتی مصرف انرژی» است. در سال های اخیر، پیشرفت در حوزه کنترل پیشرفته و هوش مصنوعی، امکان عبور از این شکاف را فراهم کرده است. کنترل پیش بین اقتصادی (EMPC) به عنوان توسعه ای از کنترل پیش بین مدل، امکان بهینه سازی مستقیم اهداف اقتصادی و انرژی را در کنار رعایت قیود فرآیندی و کیفی فراهم می کند. ترکیب این رویکرد با الگوریتم های هوش مصنوعی، سیستم های مدیریت انرژی را به سامانه هایی پیش نگر، تطبیق پذیر و تصمیم ساز تبدیل می کند [۶، ۸، ۹]. هدف این مقاله مروری، ارائه یک چارچوب مفهومی جامع برای سامانه مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر EMPC و هوش مصنوعی در صنایع غذایی و بررسی کاربردها، الزامات و چالش های آن در همسویی با ISO 50001 است.

۲. روش مرور

این مقاله یک مرور روایتی ساختاریافته است که منابع معتبر علمی، استانداردهای بین المللی و گزارش های صنعتی را پوشش می دهد. تمرکز اصلی بر مطالعات مرتبط با مصرف انرژی در صنایع غذایی، کنترل پیش بین، هوش مصنوعی و سیستم های مدیریت انرژی بوده است.

۳. ویژگی های مصرف انرژی در صنایع غذایی

الگوی مصرف انرژی در صنایع غذایی به شدت وابسته به نوع فرآیند و محصول است. فرآیندهای حرارتی، تبرید صنعتی و خشک کردن بیشترین سهم مصرف انرژی را دارند. جدول ۱ دسته بندی اصلی مصارف انرژی را بر اساس مرور ادبیات نشان می دهد [۱۰، ۱۱].

جدول ۱- دسته بندی مصرف انرژی در صنایع غذایی

دسته مصرف	واحدهای نمونه	ویژگی انرژی	دفرنس
فرآیندهای حرارتی	پاستوریزاسیون، پخت، تبخیر	مصرف بالای بخار و انرژی حرارتی	[۱۲]
تبرید صنعتی	سردخانه، تونل انجماد، چیلر	بیشترین مصرف برق و سهم بالا در پیک بار	[۱۳]
خشک کن ها	اسپری درایر، نواری	از انرژی برترین عملیات ها و حساس به کیفیت نهایی	[۱۱]
تجهیزات موتوری	پمپ ها، فن ها، کمپرسورها	مصرف پیوسته و ظرفیت بالای بهینه سازی	[۱۳]

۴. چارچوب مفهومی سامانه مدیریت انرژی هوشمند پیشنهادی

چارچوب مفهومی سامانه مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر EMPC و هوش مصنوعی که در این مقاله بررسی شده است، در جدول ۲ ارائه شده است. این چارچوب شکاف میان پایش انرژی و کنترل عملیاتی را پر کرده و به عنوان ابزار اجرایی سیستم مدیریت انرژی مطابق ISO 50001 عمل می‌کند [۷، ۱۴].

جدول ۲ نشان می‌دهد که سامانه پیشنهادی از چند لایه به هم پیوسته تشکیل شده است: لایه فرآیندی صنایع غذایی، لایه اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده، لایه پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، لایه کنترل پیش‌بین اقتصادی، لایه اجرا و بازخورد کنترلی، و در نهایت لایه مدیریتی مطابقت دارد [۸، ۹].

۵. کاربردهای سامانه مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر EMPC و هوش مصنوعی در صنایع غذایی

۵.۱. سیستم‌های تبرید صنعتی و سردخانه‌ها

سیستم‌های تبرید صنعتی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در صنایع غذایی هستند [۱۵]. وجود اینرسی حرارتی بالا در محصول و فضای سردخانه، امکان انعطاف‌پذیری کنترلی را فراهم می‌کند. سامانه‌های EMPC با پیش‌بینی بار تبرید و رعایت قیود دمایی، قادرند مصرف انرژی را به ساعات کم‌هزینه منتقل کرده، پیک بار را بدون خاموشی کامل کاهش دهند و عملکرد کمپرسورها و دی‌فراس‌ت را بهینه کنند [۱۶].

۵.۲. دیگ بخار و شبکه بخار

بخار نقش محوری در فرآیندهای غذایی دارد و بخش بزرگی از انرژی حرارتی را مصرف می‌کند. EMPC امکان تنظیم فشار و دبی بخار متناسب با نیاز واقعی فرآیند، کاهش نوسانات فشار و افزایش راندمان کل سیستم را فراهم می‌سازد [۸].

۵.۳. فرآیندهای حرارتی

فرآیندهای پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون و پخت مستعد over-processing هستند که منجر به مصرف انرژی اضافی می‌شود. کنترل پیش‌بین اقتصادی با تعریف قیود ایمنی غذایی، حداقل انرژی لازم برای دستیابی به ایمنی میکروبی را تضمین می‌کند [۱۳].

۵.۴. خشک‌کن‌ها

خشک‌کردن یکی از انرژی‌برترین عملیات‌هاست. EMPC با کنترل هم‌زمان دما، رطوبت، دبی هوا و زمان ماند، انرژی ویژه فرآیند را کاهش داده و یکنواختی کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد [۱۱، ۱۷].

۵.۵. هم‌افزایی با سیستم مدیریت انرژی

سامانه پیشنهادی به عنوان پل ارتباطی میان سطح عملیاتی و مدیریتی عمل کرده و داده‌ها و تصمیمات کنترلی را مستقیماً در فرآیندهای بازنگری انرژی، تعیین EnPI و بهبود مستمر ISO 50001 به کار می‌گیرد [۷].

جدول ۲- کاربردهای EMPC مبتنی بر هوش مصنوعی در واحدهای کلیدی صنایع غذایی

واحد صنعتی	هدف کنترلی (نمونه)	ملاحظات ایمنی / کیفیت	رفرنس
تبرید صنعتی	بهینه‌سازی توالی کمپرسورها، کنترل دی‌فراس‌ت	حفظ دمای محصول / اتاق در محدوده مجاز	[۱۶]

[۱۶]	جلوگیری از عبور دما از آستانه‌های ایمنی	جابه‌جایی مصرف به ساعات کم‌هزینه، کاهش پیک بدون خاموشی کامل	سردخانه
[۸]	قیود فشار/ ایمنی تجهیز و نیاز پایدار فرایند	بهینه‌سازی فشار/ دبی، کاهش نوسانات، بهبود راندمان احتراق/ بهره‌برداری	دیگ بخار و شبکه بخار
[۱۳]	رعایت الزامات ایمنی میکروبی و کیفیت	حداقل‌سازی انرژی با حفظ پروفایل دما-زمان	فرآیندهای حرارتی
[۱۱]	کنترل aw / رطوبت نهایی،	کمینه‌سازی انرژی تبخیر با حفظ رطوبت نهایی/ کیفیت	خشک‌کن‌ها

۷. چالش‌ها و مسیرهای آینده پژوهش

چالش‌های اصلی شامل کیفیت داده، پذیرش عملیاتی، امنیت سایبری و تضمین ایمنی غذایی است [۱۳]. پژوهش‌های آینده می‌توانند بر یادگیری تقویتی، اهداف همزمان انرژی-کربن و پاسخگویی بار تمرکز کنند [۹].

۸. مقایسه EMPC با رویکردهای متداول مدیریت انرژی در صنایع غذایی

بخش قابل توجهی از سیستم‌های مدیریت انرژی در صنایع غذایی مبتنی بر رویکردهای پایش‌محور (Monitoring-based) یا بهینه‌سازی ایستا (Static Optimization) هستند. مطابق با جدول ۳، این رویکردها عمدتاً بر تحلیل داده‌های تاریخی، تعریف شاخص‌های عملکرد انرژی و اجرای اقدامات اصلاحی دستی تکیه دارند. اگرچه این روش‌ها می‌توانند آگاهی انرژی را افزایش دهند، اما به دلیل فقدان کنترل بلادرنگ و پیش‌بینی آینده سیستم، توان محدودی در کاهش پایدار مصرف انرژی دارند [۵، ۷، ۱۸، ۱۹].

در مقابل، کنترل پیش‌بین اقتصادی (EMPC) یک تغییر پارادایم در مدیریت انرژی ایجاد می‌کند. این رویکرد به جای واکنش به مصرف گذشته، تصمیمات کنترلی را بر اساس پیش‌بینی رفتار آینده سیستم اتخاذ می‌کند و مستقیماً اهداف اقتصادی و انرژی را در تابع هدف کنترل لحاظ می‌نماید [۶].

جدول ۳- مقایسه رویکردهای مدیریت انرژی در صنایع غذایی

رویکرد	ویژگی اصلی	محدودیت در صنایع غذایی	رفرنس
پایش انرژی (Monitoring)	تحلیل داده تاریخی	بدون کنترل بلادرنگ، وابسته به اپراتور	[۷]
بهینه‌سازی ایستا	تنظیم setpoint ثابت	عدم انطباق با تغییر بار تولید	[۵]

قوانین تجربی	ساده و سریع	وابسته به تجربه انسانی، غیرقابل تعمیم	[۱۳]
EMPC مبتنی بر AI	پیش‌بینی	نیازمند داده و مدل	[۶]

۹. ملاحظات ایمنی غذایی و کیفیت محصول در کنترل پیش‌بین انرژی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته مدیریت انرژی در صنایع غذایی، تضمین ایمنی غذایی و کیفیت محصول است. برخلاف صنایع فرآیندی دیگر، در صنایع غذایی خروج از محدوده‌های دمایی یا زمانی مجاز می‌تواند منجر به رشد میکروبی، کاهش ماندگاری یا افت کیفیت حسی شود [۱۳].

کنترل پیش‌بین اقتصادی به‌طور ذاتی قابلیت مدیریت این محدودیت‌ها را دارد، زیرا قیود ایمنی و کیفی می‌توانند به‌صورت قیود سخت (Hard Constraints) در مسئله بهینه‌سازی تعریف شوند. به این ترتیب، هیچ تصمیم کنترلی خارج از محدوده‌های مجاز اعمال نخواهد شد [۶].

نمونه‌هایی از قیود رایج در صنایع غذایی شامل:

- حداقل و حداکثر دمای محصول
 - حداکثر زمان ماند در بازه‌های دمایی خاص
 - محدودیت نرخ تغییر دما (thermal ramping)
 - قیود مربوط به یکنواختی کیفیت محصول
- این قابلیت، EMPC را به یکی از معدود روش‌های کنترلی تبدیل می‌کند که به‌طور هم‌زمان اهداف انرژی و ایمنی غذایی را محقق می‌سازد [۲۰].

۱۰. الزامات داده، زیرساخت دیجیتال و آمادگی صنعتی

پیاده‌سازی موفق سامانه‌های EMPC مبتنی بر هوش مصنوعی در صنایع غذایی مستلزم فراهم بودن حداقل‌هایی در حوزه داده و زیرساخت دیجیتال است. برخلاف تصور رایج، این الزامات الزاماً پیچیده یا پرهزینه نیستند، اما باید به‌صورت ساختاریافته طراحی شوند [۹]. مواردی از این الزامات در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- الزامات داده و زیرساخت برای پیاده‌سازی EMPC در صنایع غذایی

لایه	الزامات کلیدی	توضیح	رفرنس
اندازه‌گیری انرژی	زیرکنترینگ برق/ بخار	تفکیک مصارف اصلی	[۷]
داده فرآیندی	دما، فشار، دبی	قیود کیفیت و ایمنی	[۱۳]
داده تولید	SKU، شیفت، CIP	توضیح تغییر بار	[۶]
زیرساخت دیجیتال	PLC/SCADA/IIoT	اجرای کنترل بلادرنگ	[۹]
تحلیل و مدل‌سازی	AI/ML + MPC solver	پیش‌بینی و بهینه‌سازی	[۸]

۱۱. پتانسیل کاهش انرژی، هزینه و انتشار کربن

مطالعات صنعتی و پژوهشی نشان می‌دهند که استفاده از EMPC در سیستم‌های انرژی بر صنایع غذایی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی و پیک بار شود. این کاهش، به‌طور مستقیم به کاهش هزینه‌های انرژی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود [۱۳].

به‌ویژه در سیستم‌های تبرید صنعتی و سردخانه‌ها، ترکیب انعطاف‌پذیری حرارتی با کنترل پیش‌بین، امکان هم‌راستاسازی مصرف انرژی با تعرفه‌های زمانی یا منابع تجدیدپذیر را فراهم می‌کند [۹].

۱۲. مسیرهای آینده پژوهش و توسعه صنعتی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، توسعه سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند در صنایع غذایی همچنان با فرصت‌های پژوهشی و صنعتی متعددی همراه است (جدول ۵). از جمله مسیرهای آینده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ادغام یادگیری تقویتی با EMPC برای تصمیم‌سازی تطبیقی
 - تعریف اهداف چندگانه انرژی-هزینه-کربن در تابع هدف کنترل
 - اتصال سامانه‌های EMPC به بازارهای پاسخگویی بار و برق
 - توسعه مدل‌های استاندارد شده برای زیرصنایع غذایی (لبنیات، نوشیدنی، منجمد)
- این مسیرها می‌توانند EMPC را از یک ابزار پیشرفته کنترلی به یک ستون اصلی تحول دیجیتال در صنایع غذایی تبدیل کنند [۱۳، ۲۱].

جدول ۵- انواع منافع حاصل از پیاده‌سازی EMPC در صنایع غذایی

نوع منفعت	شرح	رفرنس
کاهش مصرف انرژی	بهینه‌سازی setpoint و زمان‌بندی	[۱۲]
کاهش پیک بار	مدیریت بار تبرید/ بخار	[۱۷]
کاهش هزینه	استفاده از تعرفه‌های زمانی	[۵]
کاهش CO ₂	کاهش مصرف سوخت/ برق	[۹]

۱۳. نتیجه‌گیری

این مقاله مروری نشان داد که مدیریت انرژی در صنایع غذایی نیازمند رویکردهایی فراتر از پایش و بهینه‌سازی ایستا است. سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر کنترل پیش‌بین اقتصادی و هوش مصنوعی با تلفیق پیش‌بینی، بهینه‌سازی قیودمحور و کنترل حلقه بسته، امکان کاهش مصرف انرژی و پیک بار را بدون به خطر انداختن ایمنی و کیفیت محصول فراهم می‌سازند.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



معاونت انرژی و امور بین‌المللی
وزارت انرژی و امور بین‌المللی

چارچوب مفهومی ارائه شده نشان می‌دهد که این سامانه‌ها می‌توانند به عنوان هسته اجرایی سیستم مدیریت انرژی در صنایع غذایی عمل کرده و الزامات ISO 50001 را از سطح مدیریتی به سطح عملیاتی منتقل کنند [۷]. بیشترین پتانسیل کاربرد این رویکرد در تبرید صنعتی، سردخانه‌ها، دیگ بخار و فرآیندهای حرارتی انرژی بر مشاهده می‌شود. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که EMPC مبتنی بر هوش مصنوعی نه تنها یک فناوری کنترلی، بلکه یک رویکرد سیستماتیک برای تحول مدیریت انرژی در صنایع غذایی است. توسعه‌های آینده در حوزه یادگیری تقویتی و ادغام با اهداف کربنی می‌تواند این رویکرد را به بلوغ صنعتی بالاتری برساند.



۱۴. مراجع

1. Diehl, M., R. Amrit, and J.B. Rawlings, *A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010. 56(3): p. 703-707.
2. Armstrong, K., et al., *Estimating energy consumption and GHG emissions in the US food supply chain for net-zero*. npj Science of Food, 2025. 9(1): p. 19.
3. Drgoňa, J., et al., *All you need to know about model predictive control for buildings*. Annual reviews in control, 2020. 50: p. 190-232.
4. Jebbor, I., Z. Benmamoun, and H. Hachmi, *Revolutionizing cleaner production: The role of artificial intelligence in enhancing sustainability across industries*. J. Infrastruct. Policy Dev, 2024. 8: p. 7455.
5. Jovanović, B. and J. Filipović, *ISO 50001 standard-based energy management maturity model-proposal and validation in industry*. Journal of cleaner production, 2016. 112: p. 2744-2755.
6. Rawlings, J.B. and D. Mayne. *Model predictive control*. in *The 2008 Spring National Meeting*. 2008.
7. Poveda-Orjuela, P.P., et al., *Parameterization ,analysis, and risk management in a comprehensive management system with emphasis on energy and performance (ISO 50001: 2018)*. Energies, 2020. 13(21): p. 5579.
8. Zhang, X., et al., *Machine learning-based hybrid dynamic modeling and economic predictive control of carbon capture process for ship decarbonization*. arXiv preprint arXiv:2502.05833, 2025.
9. Starke, A.R. and A.K. da Silva, *A review on the applicability of machine learning techniques to the metamodeling of energy systems*. Numerical Heat Transfer ,Part B: Fundamentals, 2025. 86(2): p. 214-243.
10. Fellows, P.J., *Food processing technology: principles and practice*. 2022: Woodhead publishing.
11. Mujumdar, A.S., *Handbook of industrial drying*. 2006: CRC press.
12. Szymańska, E.J. and R. Mroczek, *Energy intensity of food industry production in poland in the process of energy transformation*. Energies, 2023. 16(4): p. 1843.
13. Zhang, R., et al. *Energy efficiency and demand response assessment for refrigerated warehouses*. in *Building Simulation 2023*. 2023. IBPSA.
14. Bunse, K., et al., *Integrating energy efficiency performance in production management-gap analysis between industrial needs and scientific literature*. Journal of cleaner production, 2011. 19(6-7): p. 667-679.
15. Miranda, R., *Understanding and managing risk of norovirus contamination on frozen berries from farm to fork*. 2019, Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies.
16. Wang, M., et al., *Energy-saving control method for factory mushroom room air conditioning based on MPC*. Energies, 2023. 16(22): p. 7623.



17. Reddy, V.J., et al., *Pathway to sustainability: An overview of renewable energy integration in building systems*. Sustainability, 2024. 16(2): p. 638.
18. McKane, A., et al., *Predicting the quantifiable impacts of ISO 50001 on climate change mitigation*. Energy policy, 2017. 107: p. 278-288.
19. Hovgaard, T.G., L.F. Larsen, and J.B. Jørgensen. *Flexible and cost efficient power consumption using economic MPC a supermarket refrigeration benchmark*. in *2011 50th IEEE conference on decision and control and European control conference*. 2011. IEEE.
20. Vaughn, M., *ASHRAE Research Report: 2017-2018*. ASHRAE Journal, 2018. 60(10): p. 73-84.
21. Angeli, D., R. Amrit, and J.B. Rawlings, *On average performance and stability of economic model predictive control*. IEEE transactions on automatic control, 2011. 57(7): p. 1615-1626.