



مدل سازی بهینه سازی مصرف آب و بخار در کارخانه تولید کنسرو و رب گوجه بر پایه شاخص های بهره وری سبز و داده های واقعی صنعتی

مهدی ظهوریان امین^{*۱}

۱- دکتری علوم و صنایع غذایی - مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد واحد قوچان، شرکت تولیدی حسنانو (زشک)، ایران.

ایمیل: m_zohorian33@iran.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

صنایع فرآوری گوجه فرنگی از جمله واحدهای صنعتی با مصرف بالای آب و انرژی حرارتی محسوب می شوند که به دلیل وابستگی گسترده به سامانه های بخار، خطوط شست و شو، تغلیظ و استریلیزاسیون، سهم قابل توجهی در مصرف منابع و هزینه های عملیاتی صنایع غذایی دارند. افزایش محدودیت های منابع آبی، رشد هزینه های انرژی و الزامات زیست محیطی موجب شده است که بهینه سازی مصرف آب و بخار در این صنایع به یکی از مهم ترین اولویت های مدیریتی و مهندسی تبدیل شود. هدف این پژوهش، ارائه یک مدل یکپارچه برای بهینه سازی همزمان مصرف آب و بخار در کارخانه تولید کنسرو و رب گوجه بر پایه شاخص های بهره وری سبز و داده های واقعی صنعتی است. در این مطالعه، داده های عملیاتی مرتبط با مصرف آب، بخار، انرژی حرارتی، راندمان تولید و شدت مصرف منابع در بخش های مختلف فرآیند شامل شست و شوی مواد اولیه، پیش گرمایش، تغلیظ، استریلیزاسیون و بسته بندی مورد تحلیل قرار گرفت. مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد بهینه سازی چندهدفه و شاخص های بهره وری سبز طراحی شد تا ضمن کاهش مصرف منابع، کارایی فرآیند و عملکرد زیست محیطی نیز بهبود یابد. برای تحلیل داده ها از مدل های آماری، شاخص شدت مصرف انرژی، شاخص رد پای آب و تابع بهینه سازی چندمعیاره استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین سهم مصرف بخار مربوط به واحد تغلیظ و بیشترین سهم مصرف آب مربوط به مرحله شست و شوی اولیه مواد خام است. همچنین اجرای مدل پیشنهادی سبب کاهش شدت مصرف بخار، بهبود راندمان حرارتی خطوط تولید و کاهش مصرف ویژه آب در هر تن محصول نهایی شد. تحلیل شاخص های بهره وری سبز نیز بیانگر آن بود که همزمانی مدیریت آب و انرژی می تواند علاوه بر کاهش هزینه های تولید، اثرات زیست محیطی فرآیند را نیز محدود کند. مدل ارائه شده قابلیت استفاده در سایر صنایع تبدیلی غذایی با فرآیندهای حرارتی مشابه را نیز دارد و می تواند مبنایی برای توسعه سامانه های مدیریت پایدار منابع در صنایع غذایی باشد.

کلمات کلیدی: بهره وری سبز، مصرف بخار، مصرف آب، رب گوجه، صنایع غذایی

Optimization Modeling of Water and Steam Consumption in Tomato Paste and Canning Factories Based on Green Productivity Indicators and Real Industrial Data

Mehdi Zohurian Amin^{1,*}

1- Phd Food science and technology - material & design engineering, field of study, Hosnanow production Co, Public corporation, Iran. Email: m_zohorian33@iran.ir

* Corresponding Author

Abstract

Tomato processing industries are among the most resource-intensive sectors in the food industry due to their high dependence on water consumption and thermal energy systems. Steam-based operations such as washing, concentration, sterilization, and thermal processing significantly increase operational costs and environmental pressures in tomato paste and canning factories. Growing concerns regarding water scarcity, rising energy prices, and environmental sustainability have intensified the need for integrated optimization models capable of reducing resource consumption while maintaining production efficiency. The present study aims to develop an integrated optimization model for water and steam consumption

in tomato paste and canning factories based on green productivity indicators and real industrial operational data. Operational datasets associated with water use, steam consumption, thermal efficiency, process intensity, and production performance were evaluated across different industrial sections including raw material washing, preheating, evaporation, sterilization, and packaging processes. A multi-objective optimization framework combined with green productivity indicators was employed to simultaneously improve energy efficiency, reduce water consumption, and enhance environmental performance. Statistical analysis, energy intensity indicators, water footprint assessment, and multi-criteria optimization functions were applied for process evaluation and modeling. The findings demonstrated that evaporation units accounted for the highest steam consumption, while raw material washing processes represented the largest share of industrial water use. Implementation of the proposed optimization model led to significant reductions in steam intensity, improvements in thermal process efficiency, and lower specific water consumption per ton of final product. Furthermore, green productivity assessment revealed that integrated management of water and energy resources can substantially reduce production costs and environmental impacts simultaneously. The proposed model can also be adapted for other thermal-based food processing industries and may provide an effective framework for sustainable industrial resource management.

Keywords: Green productivity, Steam consumption, Water consumption, Tomato paste, Food industry

مقدمه

افزایش رشد جمعیت، توسعه صنایع غذایی و تشدید محدودیت‌های زیست‌محیطی طی دهه اخیر موجب شده است که مدیریت منابع آب و انرژی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعتی جهان تبدیل شود. صنایع غذایی به‌ویژه واحدهای فرآوری محصولات کشاورزی، به دلیل وابستگی همزمان به آب، انرژی حرارتی و سامانه‌های بخار، سهم قابل توجهی در مصرف منابع طبیعی دارند و از این رو همواره در کانون سیاست‌های بهره‌وری و توسعه پایدار قرار گرفته‌اند [1]. در میان صنایع غذایی، کارخانه‌های تولید رب گوجه و کنسرو به علت ماهیت حرارتی فرآیند، استفاده گسترده از بخار، شست‌وشوی مداوم تجهیزات و مصرف بالای آب صنعتی، از جمله واحدهای دارای شدت مصرف بالای انرژی و آب محسوب می‌شوند [2]. گوجه‌فرنگی یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی فرآوری‌شونده در جهان است که سهم قابل توجهی از صنایع تبدیلی غذایی را به خود اختصاص داده است. فرآیند تبدیل گوجه خام به رب و محصولات کنسروی شامل مراحل مختلفی نظیر شست‌وشو، خردایش، پیش‌گرمایش، تغلیظ، پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون و بسته‌بندی است که هر یک نیازمند مصرف مقادیر قابل توجهی آب و بخار هستند [3]. در بسیاری از واحدهای صنعتی، سامانه‌های بخار قدیمی، راندمان پایین مبدل‌های حرارتی و نبود سامانه بازیافت انرژی موجب افزایش مصرف ویژه انرژی و رشد هزینه‌های تولید می‌شود. همزمان، افزایش فشار بر منابع آبی و کاهش دسترسی به آب صنعتی پایدار، ضرورت بازنگری در الگوهای مصرف آب در صنایع غذایی را بیش از گذشته آشکار کرده است [4].

در سال‌های اخیر مفهوم بهره‌وری سبز به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین مدیریت صنعتی، توجه گسترده‌ای را در حوزه صنایع غذایی به خود جلب کرده است. بهره‌وری سبز بر این اصل استوار است که افزایش راندمان تولید باید همزمان با کاهش مصرف منابع و محدودسازی پیامدهای زیست‌محیطی انجام شود. در این چارچوب، شاخص‌هایی نظیر شدت مصرف آب، شدت مصرف انرژی، راندمان حرارتی، میزان تولید پسماند و ردپای زیست‌محیطی، به‌عنوان معیارهای کلیدی ارزیابی عملکرد صنعتی مطرح می‌شوند [9]. برخلاف رویکردهای سنتی که تنها بر افزایش ظرفیت تولید تمرکز دارند، مدل‌های مبتنی بر بهره‌وری سبز تلاش می‌کنند تعادلی میان عملکرد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کنند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که در صنایع غذایی، بیشترین اتلاف انرژی معمولاً در سامانه‌های بخار و فرآیندهای حرارتی رخ می‌دهد. بخار صنعتی به دلیل کاربرد گسترده در انتقال حرارت، تغلیظ و استریلیزاسیون، یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی در صنایع رب گوجه محسوب می‌شود [10]. راندمان پایین دیگ‌های بخار، نشتی خطوط انتقال، نبود سامانه بازیافت کندانس و کنترل نامناسب فرآیند، از عوامل اصلی افزایش شدت مصرف بخار در واحدهای صنعتی هستند [11]. از سوی دیگر، بخش عمده مصرف آب در کارخانه‌های فرآوری گوجه مربوط به شست‌وشوی مواد اولیه، شست‌وشوی خطوط تولید و خنک‌سازی تجهیزات است. در بسیاری از واحدهای صنعتی، نبود سیستم بازچرخانی آب و استفاده از روش‌های سنتی شست‌وشو موجب افزایش قابل توجه مصرف ویژه آب می‌شود [5]. ارزیابی ردپای آب و ردپای انرژی در صنایع غذایی طی سال‌های اخیر به یکی از شاخص‌های مهم تحلیل پایداری تبدیل شده است. پژوهش‌های انجام‌شده در صنایع فرآوری گوجه نشان داده‌اند که کاهش مصرف آب و بخار نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند سبب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود عملکرد زیست‌محیطی کارخانه نیز شود [7]. بر همین اساس، بسیاری از کشورها استانداردهای جدیدی برای مدیریت مصرف انرژی و آب در صنایع غذایی تدوین کرده‌اند تا شدت مصرف منابع در واحدهای تولیدی کاهش یابد [4]. مطالعات مربوط به ارزیابی چرخه عمر محصولات غذایی نیز نشان داده‌اند که بخش قابل توجهی از آثار زیست‌محیطی تولید رب گوجه ناشی از مصرف انرژی حرارتی و آب صنعتی در مراحل فرآوری است [8]. در این مطالعات، شاخص‌های مرتبط با مصرف بخار، شدت انرژی و میزان آب مصرفی در هر تن محصول، به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای تحلیل پایداری معرفی شده‌اند. به همین دلیل، توسعه مدل‌های یکپارچه برای کنترل همزمان آب و بخار می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی صنایع غذایی ایفا کند.

در کنار مباحث زیست‌محیطی، افزایش هزینه حامل‌های انرژی نیز اهمیت بهینه‌سازی مصرف بخار را دوچندان کرده است. سامانه‌های بخار صنعتی در صورت مدیریت نامناسب می‌توانند موجب اتلاف گسترده انرژی شوند. بررسی‌های انجام‌شده در صنایع فرآوری غذایی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از انرژی حرارتی مصرفی بدون استفاده مؤثر از سیستم خارج می‌شود و این مسئله هزینه نهایی تولید را افزایش می‌دهد [10]. استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه در سال‌های اخیر امکان تحلیل همزمان عوامل اقتصادی، انرژی و محیط‌زیست را فراهم کرده و موجب توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار صنعتی شده است [12]. صنایع رب گوجه در ایران نیز به دلیل مصرف بالای آب و انرژی، با چالش‌های متعددی در حوزه بهره‌وری مواجه هستند. کاهش منابع آب، افزایش هزینه سوخت و

فرسودگی بخشی از تجهیزات صنعتی، ضرورت استفاده از مدل‌های علمی برای بهینه‌سازی فرآیند را افزایش داده است. بسیاری از کارخانه‌ها همچنان از سامانه‌های سنتی بخار و روش‌های غیرهوشمند کنترل مصرف استفاده می‌کنند که این مسئله علاوه بر افزایش هزینه‌های عملیاتی، سبب کاهش راندمان تولید نیز می‌شود. از سوی دیگر، توسعه صادرات محصولات غذایی و افزایش الزامات زیست‌محیطی بازارهای بین‌المللی، صنایع غذایی را به سمت ارتقای شاخص‌های بهره‌وری و پایداری سوق داده است. یکی از چالش‌های مهم در مطالعات پیشین، بررسی جداگانه مصرف آب و انرژی بوده است. در حالی که در صنایع حرارتی غذایی، آب و بخار دارای ارتباط مستقیم فرآیندی هستند و مدیریت مستقل آن‌ها نمی‌تواند تصویر دقیقی از عملکرد واقعی سامانه ارائه دهد. همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها، تحلیل‌ها صرفاً بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی یا مدل‌های نظری انجام شده و کمتر از داده‌های واقعی صنعتی برای توسعه مدل‌های بهینه‌سازی استفاده شده است. این مسئله سبب محدود شدن قابلیت کاربرد عملی نتایج در محیط واقعی کارخانه می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی مصرف آب و بخار در کارخانه تولید کنسرو و رب گوجه طراحی شده است. در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی، شاخص‌های بهره‌وری سبز، تحلیل شدت مصرف منابع و مدل‌سازی چندهدفه، راهکاری عملی برای کاهش مصرف آب و انرژی و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی خطوط تولید ارائه شود. تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل همزمان سامانه بخار و الگوی مصرف آب در بخش‌های مختلف فرآیند تولید است تا امکان شناسایی نقاط بحرانی اتلاف منابع و ارائه سناریوهای اصلاحی فراهم شود. در فرآیند تولید رب گوجه، بخش تغلیظ یکی از پرمصرف‌ترین واحدهای صنعتی از نظر انرژی حرارتی محسوب می‌شود. در این مرحله، بخش عمده آب موجود در عصاره گوجه باید از طریق تبخیر حرارتی حذف شود تا غلظت محصول نهایی به سطح استاندارد برسد. این فرآیند وابستگی مستقیم به بخار صنعتی دارد و هرگونه کاهش راندمان حرارتی در سامانه تغلیظ می‌تواند به افزایش چشمگیر مصرف انرژی منجر شود [6]. در بسیاری از کارخانه‌ها، طراحی قدیمی تبخیرکننده‌ها، افت فشار در خطوط بخار و عدم بازیافت مناسب کندانس موجب می‌شود بخشی از انرژی حرارتی بدون استفاده مؤثر از سامانه خارج شود. به همین دلیل، بهینه‌سازی فرآیند تغلیظ نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مصرف بخار و بهبود بهره‌وری انرژی دارد. از سوی دیگر، سامانه‌های شست‌وشوی مواد اولیه نیز سهم عمده‌ای در مصرف آب صنعتی دارند. کارخانه‌های تولید کنسرو و رب گوجه برای حذف خاک، مواد معلق و آلودگی‌های سطحی از حجم بالایی آب استفاده می‌کنند. در برخی خطوط تولید، به دلیل نبود سیستم‌های بازچرخانی و کنترل هوشمند جریان، مصرف آب از سطح استاندارد فراتر می‌رود و موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی و بار آلودگی پساب می‌شود [5]. بررسی الگوی مصرف آب در این واحدها نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از آب خروجی هنوز قابلیت استفاده مجدد در مراحل اولیه شست‌وشو را دارد، اما به دلیل نبود زیرساخت مناسب بازیافت، مستقیماً وارد سامانه دفع پساب می‌شود.

در سال‌های اخیر، مفهوم شدت مصرف منابع به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد صنعتی مطرح شده است. شدت مصرف آب بیانگر میزان آب مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی است و شدت مصرف انرژی نیز میزان انرژی مورد استفاده در ازای تولید هر تن محصول را مشخص می‌کند [9]. کاهش این شاخص‌ها نه تنها موجب بهبود عملکرد اقتصادی کارخانه می‌شود، بلکه نقش مهمی در ارتقای شاخص‌های توسعه پایدار صنعتی دارد. در صنایع غذایی پیشرفته، کاهش شدت مصرف آب و انرژی یکی از اصلی‌ترین معیارهای رقابت‌پذیری صنعتی محسوب می‌شود. تحلیل مطالعات انجام‌شده در حوزه صنایع غذایی نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های چندهدفه بهینه‌سازی می‌تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت همزمان مصرف منابع باشد [12]. در این مدل‌ها، متغیرهایی مانند مصرف آب، مصرف بخار، راندمان حرارتی، هزینه تولید و شاخص‌های زیست‌محیطی به‌صورت همزمان وارد فرآیند تصمیم‌گیری می‌شوند تا بهترین وضعیت عملیاتی تعیین شود. این رویکرد نسبت به مدل‌های تک‌هدفه از دقت و کارایی بیشتری برخوردار است، زیرا امکان ایجاد تعادل میان عملکرد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی را فراهم می‌کند. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از شاخص‌های بهره‌وری سبز در صنایع غذایی، قابلیت ارزیابی همزمان کارایی تولید و پیامدهای زیست‌محیطی است. در این رویکرد، تنها افزایش ظرفیت تولید مدنظر قرار نمی‌گیرد، بلکه کاهش مصرف منابع، محدودسازی تولید آلاینده‌ها و بهبود عملکرد زیست‌محیطی نیز بخشی از اهداف اصلی محسوب می‌شود [9]. بر همین اساس، شاخص‌هایی نظیر بهره‌وری انرژی، راندمان مصرف بخار، بازده مصرف آب، نرخ بازیافت حرارتی و شاخص ردپای آب می‌توانند تصویری جامع از وضعیت واقعی کارخانه ارائه دهند. سامانه‌های بخار صنعتی معمولاً از اجزایی نظیر دیگ بخار، خطوط انتقال، مبدل‌های حرارتی، تله بخار و واحد بازیافت کندانس تشکیل شده‌اند. هرگونه اختلال در عملکرد این اجزا می‌تواند منجر به افت راندمان انرژی شود [11]. مطالعات انجام‌شده در صنایع غذایی نشان داده‌اند که استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند فشار بخار، عایق‌کاری مناسب خطوط انتقال و بازیافت حرارت خروجی می‌تواند مصرف بخار را به‌صورت قابل توجهی کاهش دهد [10]. همچنین استفاده از سامانه‌های پایش لحظه‌ای مصرف انرژی، امکان شناسایی نقاط بحرانی اتلاف حرارتی را فراهم می‌کند.

در حوزه مدیریت آب نیز فناوری‌های جدیدی برای کاهش مصرف در صنایع غذایی توسعه یافته‌اند. سیستم‌های بازچرخانی آب، شست‌وشوی چندمرحله‌ای، استفاده مجدد از آب فرآیندی و سامانه‌های تصفیه داخلی از جمله مهم‌ترین راهکارهای کاهش مصرف آب در کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی هستند [5]. برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از فناوری بازچرخانی می‌تواند مصرف آب را در صنایع فرآوری گوجه تا بیش از ۳۰ درصد کاهش دهد، بدون آنکه کیفیت محصول نهایی تحت تأثیر قرار گیرد [4]. علاوه بر عوامل فنی، نوع مدیریت صنعتی نیز در میزان مصرف منابع نقش مهمی دارد. نبود نظام یکپارچه مدیریت انرژی، ضعف در پایش مستمر مصرف و عدم استفاده از شاخص‌های عملکردی موجب می‌شود تصمیم‌گیری‌های صنعتی بر مبنای داده‌های دقیق انجام نشود. در بسیاری از کارخانه‌ها، اطلاعات مربوط به مصرف بخار و آب به‌صورت پراکنده ثبت می‌شود و تحلیل جامعی از ارتباط میان متغیرهای فرآیندی وجود ندارد. این مسئله باعث می‌شود نقاط بحرانی اتلاف منابع شناسایی نشوند و ظرفیت واقعی بهینه‌سازی مورد استفاده قرار نگیرد. امروزه توسعه سامانه‌های هوشمند تحلیل داده و مدل‌سازی صنعتی، امکان استفاده از داده‌های واقعی تولید را برای بهینه‌سازی فرآیند فراهم کرده است. تحلیل داده‌های عملیاتی در بازه‌های زمانی مختلف می‌تواند الگوهای مصرف منابع، نوسانات فرآیندی و نقاط اوج مصرف را مشخص کند و مبنای تصمیم‌گیری مهندسی قرار گیرد. استفاده از مدل‌های تحلیلی مبتنی بر داده‌های واقعی نسبت به مدل‌های صرفاً نظری از دقت بالاتری برخوردار است، زیرا شرایط واقعی خطوط تولید، نوسانات بار حرارتی و محدودیت‌های عملیاتی کارخانه را نیز در نظر می‌گیرد.

در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با ترکیب تحلیل داده‌های واقعی صنعتی، شاخص‌های بهره‌وری سبز و مدل‌سازی چندهدفه، چارچوبی جامع برای مدیریت مصرف آب و بخار در کارخانه تولید کنسرو و رب گوجه ارائه شود. این چارچوب علاوه بر کاهش مصرف منابع، بر ارتقای راندمان تولید، کاهش شدت مصرف انرژی و بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی نیز تمرکز دارد. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند مبنایی کاربردی برای توسعه سامانه‌های مدیریت پایدار منابع در صنایع غذایی و طراحی راهبردهای کاهش مصرف انرژی و آب در واحدهای فرآوری حرارتی فراهم کند.

بیان مساله

صنایع تولید کنسرو و رب گوجه از جمله صنایع راهبردی در زنجیره تأمین غذایی محسوب می‌شوند که به دلیل ماهیت فرآیندهای حرارتی، وابستگی بالایی به مصرف آب و بخار دارند. در این صنایع، بخش قابل توجهی از هزینه‌های عملیاتی مربوط به تأمین انرژی حرارتی، تولید بخار، مصرف آب صنعتی و مدیریت پساب است. افزایش قیمت حامل‌های انرژی، محدودیت منابع آب و تشدید الزامات زیست‌محیطی موجب شده است که بهره‌وری مصرف منابع به یکی از چالش‌های اساسی کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی تبدیل شود. در بسیاری از واحدهای صنعتی، الگوی مصرف آب و بخار همچنان بر پایه روش‌های سنتی کنترل فرآیند انجام می‌شود و نبود سامانه‌های تحلیلی و مدل‌های یکپارچه مدیریتی سبب افزایش اتلاف منابع و کاهش راندمان عملیاتی شده است. در کارخانه‌های تولید رب گوجه، فرآیندهایی نظیر شست‌وشوی مواد اولیه، انتقال حرارتی، تغلیظ، استریلیزاسیون و شست‌وشوی خطوط تولید، بیشترین سهم را در مصرف آب و بخار دارند. بخش تغلیظ به دلیل نیاز به تبخیر حجم بالایی از آب موجود در عصاره گوجه، یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی حرارتی محسوب می‌شود و هرگونه افت راندمان در این سامانه می‌تواند موجب افزایش شدید مصرف بخار شود. از سوی دیگر، سامانه‌های شست‌وشوی اولیه و شست‌وشوی تجهیزات نیز بخش قابل توجهی از آب صنعتی را مصرف می‌کنند. در بسیاری از کارخانه‌ها، نبود سیستم‌های بازچرخانی، عدم پایش لحظه‌ای مصرف و طراحی غیربهینه خطوط فرآیندی باعث می‌شود بخش قابل توجهی از آب و انرژی بدون استفاده مؤثر از سیستم خارج شود.

بررسی وضعیت صنایع غذایی نشان می‌دهد که مدیریت جداگانه آب و انرژی نمی‌تواند تصویر دقیقی از عملکرد واقعی کارخانه ارائه دهد، زیرا این دو متغیر در فرآیندهای حرارتی دارای ارتباط مستقیم هستند. افزایش مصرف بخار معمولاً با افزایش مصرف آب در سامانه‌های تولید و انتقال حرارت همراه است و عدم تحلیل همزمان این دو شاخص موجب کاهش دقت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی می‌شود. با وجود توسعه مطالعات مرتبط با بهره‌وری انرژی و ارزیابی زیست‌محیطی در صنایع غذایی، بخش زیادی از پژوهش‌های موجود تنها بر یکی از ابعاد مصرف منابع تمرکز داشته‌اند و کمتر به مدل‌سازی یکپارچه مصرف آب و بخار پرداخته‌اند. یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعات پیشین، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یا مدل‌های تئوریک بدون انطباق کافی با شرایط واقعی خطوط صنعتی است. در بسیاری از پژوهش‌ها، تحلیل‌ها در مقیاس محدود آزمایشگاهی انجام شده و متغیرهای واقعی نظیر نوسانات تولید، تغییرات بار حرارتی، راندمان عملیاتی تجهیزات و الگوی واقعی مصرف منابع در نظر گرفته نشده است. این مسئله سبب شده است که بخشی از نتایج ارائه‌شده قابلیت اجرایی محدودی در محیط واقعی کارخانه داشته باشند. همچنین، در بخش قابل توجهی از واحدهای تولیدی، ارزیابی عملکرد مصرف آب و بخار هنوز بر پایه شاخص‌های سنتی انجام می‌شود و از شاخص‌های بهره‌وری سبز برای تحلیل جامع وضعیت منابع استفاده نمی‌شود. نبود مدل‌های تصمیم‌یار مبتنی بر داده‌های واقعی صنعتی موجب شده است که فرآیند شناسایی نقاط بحرانی اتلاف منابع و تعیین راهکارهای اصلاحی با محدودیت مواجه شود. در نتیجه، بسیاری از کارخانه‌ها علی‌رغم سرمایه‌گذاری در توسعه خطوط تولید، همچنان با شدت مصرف بالای آب و انرژی روبه‌رو هستند.

بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر، نبود یک مدل جامع و کاربردی برای تحلیل همزمان مصرف آب و بخار در کارخانه‌های تولید کنسرو و رب گوجه بر پایه شاخص‌های بهره‌وری سبز و داده‌های واقعی صنعتی است. این پژوهش تلاش می‌کند با استفاده از مدل‌سازی چندهدفه، تحلیل شاخص‌های شدت مصرف منابع و ارزیابی عملکرد فرآیندی، چارچوبی برای کاهش مصرف آب و بخار، بهبود راندمان حرارتی و ارتقای بهره‌وری صنعتی ارائه دهد. سؤال اصلی تحقیق آن است که چگونه می‌توان با استفاده از شاخص‌های بهره‌وری سبز و داده‌های واقعی عملیاتی، الگوی مصرف آب و بخار را در صنایع فرآوری گوجه بهینه‌سازی کرد و همزمان هزینه‌های تولید و پیامدهای زیست‌محیطی را کاهش داد.

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر شیوه اجرا، توصیفی - تحلیلی مبتنی بر مدل‌سازی صنعتی است. در این مطالعه، الگوی مصرف آب و بخار در کارخانه تولید رب گوجه و کنسرو بر پایه داده‌های واقعی عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از شاخص‌های بهره‌وری سبز، مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای کاهش مصرف منابع و افزایش راندمان فرآیند طراحی شد. چارچوب کلی تحقیق شامل چهار مرحله اصلی گردآوری داده‌ها، تحلیل فرآیند، مدل‌سازی شاخص‌های بهره‌وری و بهینه‌سازی مصرف آب و بخار بود.

جامعه آماری و محدوده مطالعه

جامعه مورد مطالعه شامل خطوط تولید کارخانه فرآوری گوجه با ظرفیت صنعتی متوسط و بزرگ بود که فرآیندهای اصلی آن شامل شست‌وشوی مواد اولیه، خردایش، پیش‌گرمایش، تغلیظ، پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون و بسته‌بندی می‌شد. داده‌های فرآیندی مربوط به مصرف آب، مصرف بخار، ظرفیت تولید، دمای عملیاتی، راندمان حرارتی و میزان مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف تولید جمع‌آوری و تحلیل شد. واحدهای فرآیندی مورد بررسی در این پژوهش شامل موارد زیر بودند:

- واحد شست‌وشوی اولیه گوجه‌فرنگی
- سامانه انتقال و خردایش
- واحد پیش‌گرمایش و پخت اولیه
- تبخیرکننده و سامانه تغلیظ
- بخش استریلیزاسیون

- خطوط شست و شوی تجهیزات و بسته بندی

برای هر بخش، میزان مصرف ویژه آب و بخار در ازای تولید هر تن محصول نهایی محاسبه شد تا امکان مقایسه عملکرد واحدها فراهم شود.

گردآوری داده ها

داده های مورد استفاده در پژوهش از اطلاعات ثبت شده عملیاتی کارخانه شامل سامانه پایش بخار، دبی سنج های آب، گزارش های تولید و داده های انرژی حرارتی استخراج شد. اطلاعات مصرف بخار بر حسب کیلوگرم بخار در ساعت و داده های مصرف آب بر حسب مترمکعب در روز تحلیل شدند. همچنین اطلاعات مربوط به تولید روزانه، راندمان حرارتی و ساعات کاری خطوط تولید برای تحلیل شدت مصرف منابع مورد استفاده قرار گرفت. به منظور افزایش دقت تحلیل، داده ها در سه سطح بررسی شدند:

۱. داده های مصرف کل کارخانه

۲. داده های مصرف هر واحد فرآیندی

۳. داده های مصرف ویژه در هر تن محصول

پس از جمع آوری، داده ها از نظر خطاهای ثبت، داده های پرت و نوسانات غیرعادی بررسی و پالایش شدند تا مدل سازی بر مبنای داده های معتبر فرآیندی انجام شود.

شاخص های مورد استفاده در پژوهش

برای تحلیل عملکرد کارخانه از شاخص های بهره وری سبز استفاده شد. مهم ترین شاخص های مورد استفاده عبارت بودند از:

- شدت مصرف آب
 - شدت مصرف بخار
 - راندمان حرارتی فرآیند
 - شاخص بهره وری انرژی
 - شاخص بازده مصرف آب
 - نرخ بازیافت کندانس
 - شاخص شدت انرژی فرآیندی
- شدت مصرف آب از رابطه زیر محاسبه شد:

$$WI = W / P$$

که در آن:

WI = شدت مصرف آب

W = میزان کل مصرف آب

P = مقدار محصول تولیدی

همچنین شدت مصرف بخار به صورت زیر محاسبه شد:

$$SI = S / P$$

که در آن:

SI = شدت مصرف بخار

S = میزان کل بخار مصرفی

P = مقدار محصول نهایی تولید شده

برای ارزیابی راندمان حرارتی سامانه بخار نیز رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$\eta = (Q_{useful} / Q_{input}) \times 100$$

که در آن:

η = راندمان حرارتی

Q_{useful} = انرژی مفید فرآیند

Q_{input} = انرژی ورودی سامانه بخار

مدل سازی بهینه سازی

در این پژوهش از مدل بهینه سازی چندهدفه برای تحلیل همزمان مصرف آب و بخار استفاده شد. تابع هدف بر پایه کمیته سازی مصرف منابع و بهینه سازی راندمان فرآیند طراحی شد. متغیرهای تصمیم گیری شامل دمای عملیاتی، فشار بخار، نرخ بازیافت کندانس، میزان بازچرخانی آب و بار حرارتی فرآیند بودند. تابع کلی بهینه سازی به صورت زیر تعریف شد:

$$\text{Min } Z = \alpha W + \beta S + \gamma E$$

که در آن:

Z = تابع هدف

W = مصرف آب

S = مصرف بخار

E = مصرف انرژی کل

α, β, γ = ضرایب وزنی متغیرها

ضرایب وزنی بر اساس اهمیت هر متغیر در ساختار فرآیندی کارخانه تعیین شدند تا امکان تحلیل همزمان شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی فراهم شود.

روش تحلیل آماری

برای تحلیل داده‌ها از شاخص‌های توصیفی، تحلیل همبستگی و مدل‌سازی چندمتغیره استفاده شد. میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای ارزیابی پایداری مصرف منابع در واحدهای مختلف محاسبه شد. همچنین ارتباط میان مصرف بخار، مصرف آب و راندمان تولید با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره بررسی شد.

به منظور تحلیل شدت مصرف منابع در بخش‌های مختلف کارخانه، ماتریس مقایسه‌ای فرایندها طراحی شد تا سهم هر واحد در مصرف کل آب و بخار مشخص شود.

جدول ۱ - شاخص‌های اصلی مورد استفاده در تحلیل فرآیند

شاخص	واحد اندازه‌گیری	هدف تحلیل
شدت مصرف آب	مترمکعب بر تن محصول	ارزیابی کارایی مصرف آب
شدت مصرف بخار	کیلوگرم بر تن محصول	ارزیابی مصرف انرژی حرارتی
راندمان حرارتی	درصد	تحلیل عملکرد سامانه بخار
نرخ بازیافت کندانس	درصد	ارزیابی بازیافت انرژی
شدت انرژی	مگاژول بر تن محصول	تحلیل مصرف کل انرژی

تحلیل جدول نشان می‌دهد که شاخص‌های انتخاب‌شده امکان ارزیابی همزمان عملکرد انرژی، مصرف آب و کارایی فرآیندی را فراهم می‌کنند و مبنای مناسبی برای طراحی مدل بهره‌وری سبز در صنایع فرآوری گوچه محسوب می‌شوند.

مدل مفهومی پژوهش

مدل مفهومی پژوهش بر مبنای ارتباط میان سه بخش اصلی طراحی شد:

- الگوی مصرف آب
- سامانه بخار و انرژی حرارتی
- شاخص‌های بهره‌وری سبز

در این چارچوب، داده‌های واقعی خطوط تولید وارد سامانه تحلیل شده و پس از ارزیابی شدت مصرف منابع، نقاط بحرانی اتلاف آب و بخار شناسایی شدند. سپس بر اساس مدل چندهدفه، سناریوهای بهینه‌سازی برای کاهش مصرف منابع و بهبود راندمان فرآیند طراحی شد. نتیجه این مدل، ارائه ساختاری برای مدیریت همزمان آب و انرژی در صنایع تولید رب گوچه است که علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، می‌تواند موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی و افزایش پایداری صنعتی شود.

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های عملیاتی کارخانه نشان داد که الگوی مصرف آب و بخار در خطوط تولید رب گوچه و کنسرو دارای نوسانات قابل توجهی در واحدهای مختلف فرآیندی است. بررسی شدت مصرف منابع بیانگر آن بود که بخش تغلیظ و تبخیر، بیشترین سهم مصرف بخار را در کل سامانه تولید به خود اختصاص داده است، در حالی که واحد شست‌وشوی اولیه مواد خام، بالاترین میزان مصرف آب صنعتی را داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر بهینه‌سازی این دو بخش می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف منابع و بهبود بهره‌وری فرآیند داشته باشد.

تحلیل مصرف بخار در واحدهای فرآیندی

بررسی داده‌های سامانه بخار نشان داد که توزیع مصرف انرژی حرارتی در خطوط تولید یکنواخت نیست و بخشی از فرایندها دارای شدت مصرف بسیار بالاتری نسبت به سایر واحدها هستند. واحد تغلیظ به دلیل نیاز مداوم به تبخیر آب موجود در عصاره گوچه، بالاترین بار حرارتی فرآیند را ایجاد کرده است. همچنین بررسی راندمان انتقال حرارت نشان داد که بخشی از بخار تولیدشده به دلیل افت فشار، نشتی خطوط و بازیافت ناقص کندانس، بدون استفاده مؤثر از سامانه خارج می‌شود.

جدول ۲ - توزیع مصرف بخار در واحدهای اصلی کارخانه

واحد فرآیندی	سهم از مصرف کل بخار (%)
پیش‌گرمایش	18
تغلیظ	46
استریلیزاسیون	21
شست‌وشوی تجهیزات	9
سایر بخش‌ها	6

تحلیل جدول فوق نشان می‌دهد که تقریباً نیمی از کل بخار مصرفی کارخانه مربوط به بخش تغلیظ است. این مسئله اهمیت استفاده از سامانه‌های تبخیر چندمرحله‌ای، بازیافت حرارت و کنترل دقیق فشار بخار را در این بخش آشکار می‌کند. همچنین مشخص شد که در ساعات اوج تولید، نوسانات بار حرارتی موجب افزایش مصرف ویژه بخار می‌شود و این موضوع نشان‌دهنده نیاز به کنترل هوشمند بار بخار در خطوط فرآیندی است. بررسی عملکرد سامانه بازیافت کندانس نیز نشان داد که افزایش نرخ بازیافت می‌تواند به صورت مستقیم موجب کاهش مصرف انرژی دیگ بخار شود. تحلیل داده‌ها نشان داد که هر ۱۰ درصد افزایش در بازیافت کندانس، سبب کاهش قابل توجه مصرف سوخت و افت بار حرارتی سامانه تولید بخار می‌شود.

تحلیل مصرف آب در فرآیند تولید

نتایج مربوط به مصرف آب صنعتی نشان داد که بیشترین حجم مصرف مربوط به مرحله شست‌وشوی اولیه گوجه‌فرنگی و شست‌وشوی خطوط انتقال است. در این بخش‌ها، مصرف پیوسته آب بدون استفاده از سامانه‌های بازچرخانی، شدت مصرف آب را افزایش داده است.

جدول ۳ - الگوی مصرف آب در بخش‌های مختلف کارخانه

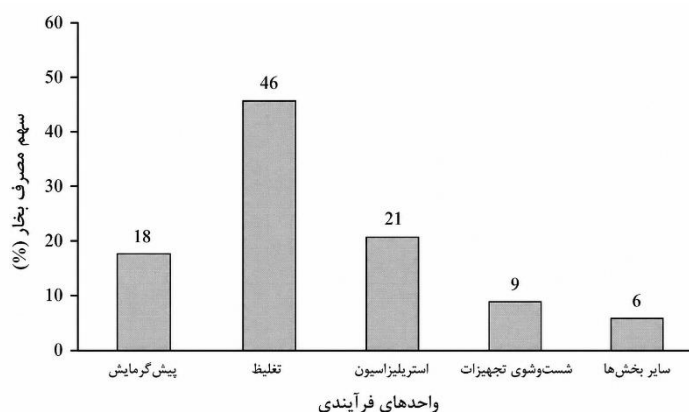
بخش فرآیندی	سهم از مصرف کل آب (%)
شست‌وشوی اولیه	41
خنک‌سازی تجهیزات	17
شست‌وشوی خطوط	22
فرآیند تغلیظ	11
سایر مصارف	9

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد مصرف آب کارخانه تنها در دو بخش شست‌وشوی اولیه و شست‌وشوی خطوط تولید متمرکز است. این موضوع بیانگر آن است که اصلاح الگوی شست‌وشو، استفاده از سیستم‌های چندمرحله‌ای و بازچرخانی آب می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش شدت مصرف آب داشته باشد.

بررسی داده‌های فرآیندی نشان داد که بخشی از آب خروجی مرحله شست‌وشوی ثانویه همچنان از کیفیت مناسبی برای استفاده مجدد در مراحل ابتدایی شست‌وشو برخوردار است. بر همین اساس، طراحی سامانه بازچرخانی داخلی می‌تواند موجب کاهش محسوس مصرف آب تازه در کارخانه شود.

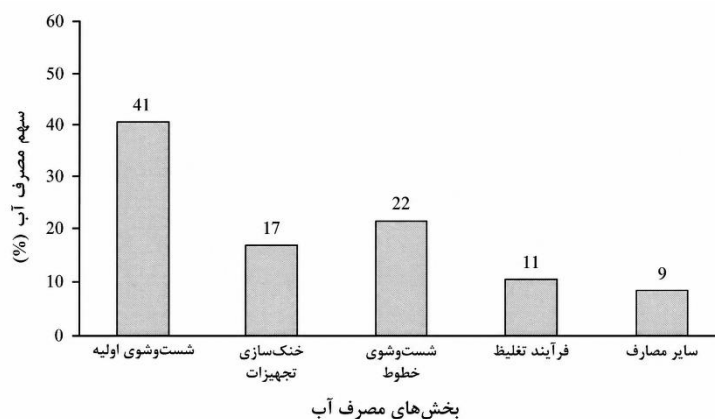
تحلیل شدت مصرف منابع

برای ارزیابی عملکرد کلی کارخانه، شدت مصرف آب و بخار در ازای تولید هر تن محصول محاسبه شد. نتایج نشان داد که تغییرات شدت مصرف منابع در بازه‌های زمانی مختلف به شدت تحت تأثیر ظرفیت تولید، بار حرارتی فرآیند و راندمان سامانه بخار قرار دارد.



نمودار ۱ - ارتباط میان ظرفیت تولید و شدت مصرف بخار

تحلیل روند نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت تولید، شدت مصرف بخار کاهش یافته است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که در ظرفیت‌های پایین، بخشی از انرژی سامانه بخار به دلیل افت راندمان و عدم تعادل بار حرارتی هدر می‌رود. در مقابل، افزایش ظرفیت تولید موجب استفاده مؤثرتر از انرژی حرارتی و کاهش مصرف ویژه بخار شده است.



نمودار ۲- روند تغییرات شدت مصرف آب

بررسی نمودار فوق نشان می دهد که استفاده از سامانه های کنترل جریان و بازچرخانی داخلی موجب کاهش تدریجی شدت مصرف آب شده است. این کاهش در بخش شست و شوی اولیه بیشتر از سایر واحدها مشاهده شد.

ارزیابی شاخص های بهره وری سبز

تحلیل شاخص های بهره وری سبز نشان داد که بهبود همزمان مصرف آب و بخار، علاوه بر کاهش هزینه های عملیاتی، اثر مستقیمی بر عملکرد زیست محیطی کارخانه دارد. کاهش مصرف بخار موجب افت مصرف سوخت دیگ های بخار و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده های ناشی از احتراق شده است. همچنین کاهش مصرف آب صنعتی سبب کاهش حجم پساب تولیدی و افت بار تصفیه خانه صنعتی شده است.

جدول ۴- تغییرات شاخص های بهره وری پس از اجرای مدل بهینه سازی

شاخص	قبل از بهینه سازی	بعد از بهینه سازی
شدت مصرف بخار	100%	82%
شدت مصرف آب	100%	79%
راندمان حرارتی	100%	118%
نرخ باز یافت کندانس	100%	126%

نتایج جدول نشان می دهد که مدل پیشنهادی توانسته است عملکرد سامانه بخار و مصرف آب را به صورت همزمان بهبود دهد. بیشترین تغییر مربوط به افزایش نرخ باز یافت کندانس بوده است که تأثیر مستقیم بر کاهش مصرف انرژی حرارتی داشته است.

تحلیل همبستگی میان مصرف آب و بخار

تحلیل همبستگی متغیرها نشان داد که میان مصرف بخار و مصرف آب در واحدهای حرارتی رابطه مستقیم وجود دارد. افزایش بار حرارتی فرآیند معمولاً با افزایش مصرف آب در بخش های خنک سازی و انتقال حرارت همراه بوده است. این نتیجه نشان می دهد که مدیریت مستقل آب و انرژی نمی تواند بهینه ترین وضعیت عملیاتی را ایجاد کند و استفاده از مدل های یکپارچه برای تحلیل همزمان این متغیرها ضروری است. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط افزایش راندمان حرارتی، شدت مصرف آب نیز کاهش یافته است. این مسئله به دلیل کاهش نیاز به خنک سازی اضافی و بهبود تعادل حرارتی خطوط تولید رخ داده است.

تحلیل عملکرد سامانه بخار

بررسی عملکرد دیگ بخار نشان داد که بخش قابل توجهی از افت راندمان مربوط به نوسانات فشار و دمای بخار در ساعات اوج مصرف است. در شرایط بارگذاری نامتعادل، بخشی از انرژی حرارتی بدون استفاده مؤثر از سامانه خارج می شود و موجب افزایش مصرف سوخت می گردد. تحلیل داده ها نشان داد که استفاده از کنترل کننده های هوشمند فشار بخار و عایق کاری مناسب خطوط انتقال می تواند راندمان سامانه بخار را به صورت قابل توجهی افزایش دهد. همچنین باز یافت بخار کندانس و استفاده مجدد از حرارت برگشتی، موجب کاهش بار حرارتی دیگ بخار و کاهش شدت مصرف انرژی شده است.

مدل نهایی بهینه سازی

بر اساس نتایج تحلیل ها، مدل نهایی پژوهش بر سه محور اصلی استوار شد:

- کنترل هوشمند مصرف بخار
- بازچرخانی آب فرآیندی
- ارتقای شاخص های بهره وری سبز

این مدل امکان پایش همزمان مصرف آب و بخار را فراهم می کند و می تواند با تحلیل داده های فرآیندی، نقاط بحرانی اتلاف منابع را شناسایی کند. همچنین ساختار مدل به گونه ای طراحی شده است که قابلیت توسعه برای سایر صنایع غذایی حرارتی را نیز داشته باشد.

بررسی روند زمانی مصرف منابع در خطوط تولید نشان داد که الگوی مصرف آب و بخار به شدت تحت تأثیر تغییرات بار تولید، نوع محصول نهایی و شرایط عملیاتی کارخانه قرار دارد. در بازه هایی که ظرفیت تولید افزایش یافته بود، راندمان حرارتی سامانه بخار نیز بهبود پیدا کرده و شدت مصرف بخار کاهش یافته

است. این موضوع بیانگر آن است که بخشی از اتلاف انرژی در شرایط بارگذاری پایین رخ می‌دهد و استفاده غیربهره‌مند از تجهیزات حرارتی در ظرفیت‌های کمتر از حد طراحی، موجب افزایش مصرف ویژه انرژی می‌شود.

تحلیل زمانی مصرف بخار

تحلیل داده‌های ثبت‌شده در ساعات مختلف کاری نشان داد که بیشترین مصرف بخار در بازه زمانی همزمانی عملیات تغلیظ و استریلیزاسیون رخ می‌دهد. در این بازه، فشار بخار خطوط فرآیندی دچار نوسان شده و بخشی از انرژی حرارتی در اثر افت راندمان انتقال حرارت از دست می‌رود.

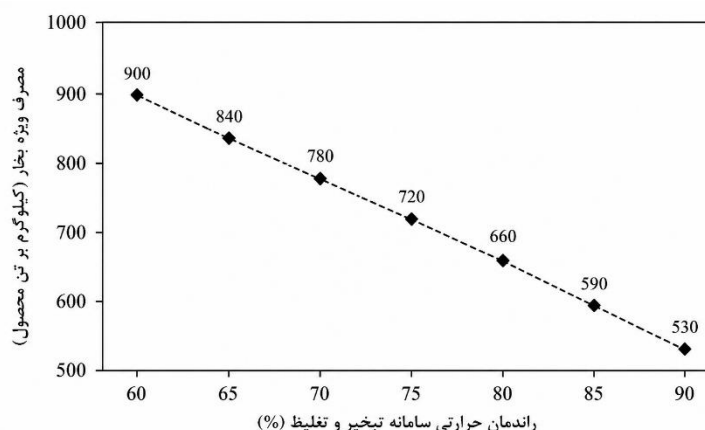
جدول ۵ - تغییرات مصرف بخار در ساعات مختلف بهره‌برداری

بازه زمانی	شدت مصرف بخار
شروع تولید	بالا
تولید پایدار	متوسط
اوج تولید	بسیار بالا
پایان شیفت	پایین

تحلیل جدول فوق نشان می‌دهد که نوسانات فرآیندی در زمان اوج تولید بیشترین تأثیر را بر شدت مصرف بخار دارند. این موضوع ضرورت استفاده از سامانه‌های کنترل بار حرارتی و تنظیم فشار بخار را در کارخانه آشکار می‌کند. بررسی‌ها نشان داد که در زمان افزایش ناگهانی تقاضای بخار، سامانه تولید بخار با افت راندمان موقت مواجه می‌شود و این مسئله موجب افزایش مصرف سوخت دیگ بخار می‌گردد.

تحلیل عملکرد حرارتی تبخیرکننده‌ها

تبخیرکننده‌های مورد استفاده در فرآیند تغلیظ، مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی حرارتی بودند. تحلیل عملکرد این تجهیزات نشان داد که اختلاف دمای عملیاتی و راندمان انتقال حرارت نقش مستقیمی در میزان مصرف بخار دارد.



نمودار ۳ - رابطه راندمان حرارتی و مصرف بخار

روند فوق نشان می‌دهد که با افزایش راندمان حرارتی، مصرف ویژه بخار کاهش یافته است. این مسئله بیانگر آن است که بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی و کاهش افت انرژی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه‌های عملیاتی کارخانه داشته باشد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که رسوب‌گذاری در سطوح انتقال حرارت یکی از عوامل مهم افت راندمان تبخیرکننده‌ها است. تجمع رسوبات حرارتی موجب کاهش انتقال انرژی و افزایش زمان فرآیند تغلیظ می‌شود که در نهایت مصرف بخار را افزایش می‌دهد. بنابراین، اجرای برنامه‌های منظم شست‌وشوی حرارتی و نگهداری تجهیزات می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد.

تحلیل بازچرخانی آب فرآیندی

نتایج نشان داد که استفاده از سامانه بازچرخانی آب در بخش شست‌وشوی اولیه، ظرفیت بالایی برای کاهش مصرف آب صنعتی ایجاد می‌کند. بخشی از آب مصرفی پس از فیلتراسیون اولیه قابلیت استفاده مجدد در مراحل ابتدایی شست‌وشو را داشت و این موضوع موجب کاهش نیاز به آب تازه شد.

جدول ۶ - اثر بازچرخانی بر کاهش مصرف آب

وضعیت فرآیند	شدت مصرف آب
بدون بازچرخانی	بالا
بازچرخانی محدود	متوسط
بازچرخانی کامل مرحله‌ای	پایین

تحلیل داده‌ها نشان داد که اجرای بازچرخانی مرحله‌ای، علاوه بر کاهش مصرف آب، موجب کاهش حجم پساب خروجی کارخانه نیز شده است. کاهش بار پساب صنعتی به‌صورت مستقیم موجب کاهش هزینه‌های تصفیه و بهبود عملکرد زیست‌محیطی سامانه تولید شده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که کنترل هوشمند دبی آب در خطوط شست‌وشو می‌تواند از مصرف غیرضروری آب جلوگیری کند. در برخی خطوط تولید، جریان پیوسته و بدون کنترل آب حتی در زمان توقف کوتاه فرآیند نیز ادامه داشته که این مسئله سبب افزایش مصرف ویژه آب شده است.

تحلیل شاخص شدت انرژی

برای ارزیابی عملکرد کلی کارخانه، شدت انرژی فرآیند در بخش‌های مختلف تولید بررسی شد. نتایج نشان داد که بخش تغلیظ بیشترین شدت انرژی را داشته و پس از آن استریلیزاسیون در رتبه دوم قرار گرفته است.

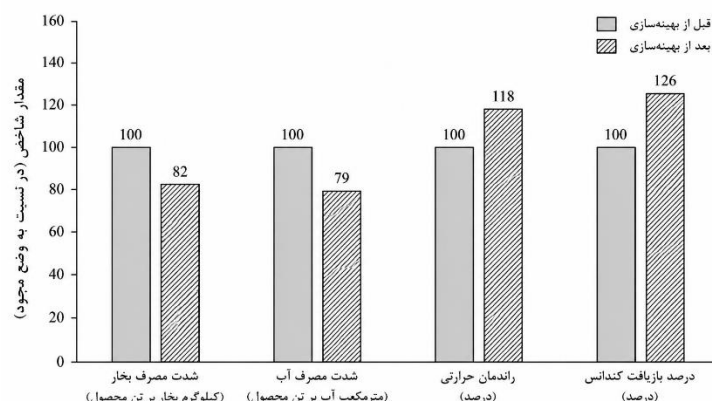
جدول ۷ - شدت انرژی در واحدهای اصلی کارخانه

واحد فرآیندی	شدت انرژی
تغلیظ	بسیار بالا
استریلیزاسیون	بالا
پیش‌گرمایش	متوسط
بسته‌بندی	پایین

نتایج فوق نشان می‌دهد که تمرکز بر بهینه‌سازی واحد تغلیظ می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف کل انرژی کارخانه داشته باشد. استفاده از تبخیرکننده‌های چنداتره، بازیافت بخار ثانویه و کنترل دقیق دمای فرآیند از مهم‌ترین راهکارهای پیشنهادی برای کاهش شدت انرژی در این بخش هستند.

تحلیل چندمتغیره مصرف منابع

مدل چندمتغیره طراحی شده در پژوهش نشان داد که متغیرهای فشار بخار، نرخ بازیافت کندانس، دمای عملیاتی و میزان بازچرخانی آب بیشترین تأثیر را بر شدت مصرف منابع دارند. نتایج مدل بیانگر آن بود که بهبود همزمان این متغیرها می‌تواند موجب کاهش همزمان مصرف آب و بخار شود.



نمودار ۴ - مدل چندمتغیره ارتباط مصرف آب و بخار

$$z=0.4x+0.6y$$

در این مدل، x نشان‌دهنده شدت مصرف بخار و y بیانگر شدت مصرف آب است. تحلیل مدل نشان داد که افزایش راندمان حرارتی موجب کاهش همزمان هر دو شاخص شده و این مسئله اهمیت مدیریت یکپارچه منابع را تأیید می‌کند.

تحلیل اثرات اقتصادی بهینه‌سازی

کاهش مصرف بخار و آب علاوه بر بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی، تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های عملیاتی کارخانه داشته است. نتایج نشان داد که کاهش مصرف سوخت دیگ بخار، افت هزینه‌های تأمین آب صنعتی و کاهش حجم پساب تولیدی موجب بهبود بهره‌وری اقتصادی خطوط تولید شده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که سرمایه‌گذاری در سامانه‌های بازیافت حرارت و بازچرخانی آب در مدت زمان نسبتاً کوتاهی قابل بازگشت است. این مسئله نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف منابع نه تنها از منظر زیست‌محیطی، بلکه از دیدگاه اقتصادی نیز دارای توجیه‌پذیری بالایی است.

تحلیل زیست‌محیطی فرآیند

ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی نشان داد که کاهش مصرف بخار سبب کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت در دیگ بخار شده است. همچنین افت مصرف آب صنعتی موجب کاهش بار آلودگی پساب خروجی و کاهش فشار بر منابع آبی شده است. نتایج تحلیل بهره‌وری سبز نشان داد که هرگونه بهبود در راندمان انرژی، اثر مستقیم بر کاهش شاخص‌های زیست‌محیطی کارخانه دارد. این موضوع بیانگر آن است که مدیریت پایدار منابع در صنایع غذایی باید به صورت همزمان بر مصرف انرژی، آب و کاهش آلاینده‌ها تمرکز داشته باشد.

جمع‌بندی نتایج تحلیلی

بررسی کلی داده‌ها نشان داد که استفاده از مدل یکپارچه بهینه‌سازی، قابلیت بالایی در کاهش مصرف آب و بخار در صنایع فرآوری گوچه دارد. مهم‌ترین یافته‌های پژوهش عبارت بودند از:

- بخش تغلیظ مهم‌ترین مصرف‌کننده بخار صنعتی است.
- شست‌وشوی اولیه بیشترین سهم مصرف آب را دارد.
- افزایش راندمان حرارتی موجب کاهش همزمان مصرف آب و بخار می‌شود.
- بازچرخانی آب و بازیافت کندانس نقش کلیدی در کاهش مصرف منابع دارند.
- مدیریت یکپارچه آب و انرژی نسبت به کنترل مستقل هر متغیر کارایی بیشتری دارد.
- شاخص‌های بهره‌وری سبز ابزار مناسبی برای تحلیل عملکرد صنعتی هستند.

نتایج نهایی پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی چندهدفه، تحلیل داده‌های واقعی صنعتی و شاخص‌های بهره‌وری سبز می‌تواند چارچوبی کاربردی برای توسعه سامانه‌های مدیریت پایدار منابع در صنایع غذایی فراهم کند.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی بهینه‌سازی مصرف آب و بخار در کارخانه تولید کنسرو و رب گوجه بر پایه شاخص‌های بهره‌وری سبز و داده‌های واقعی صنعتی انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل فرآیندهای تولید نشان داد که الگوی مصرف منابع در صنایع فرآوری گوجه به شدت تحت تأثیر عملکرد سامانه‌های حرارتی، شیوه مدیریت آب صنعتی و راندمان تجهیزات فرآیندی قرار دارد. بررسی داده‌های عملیاتی کارخانه بیانگر آن بود که بخش تغلیظ مهم‌ترین مصرف‌کننده بخار و بخش شست‌وشوی اولیه مهم‌ترین مصرف‌کننده آب صنعتی است و بخش عمده شدت مصرف منابع در این دو واحد متمرکز شده است. تحلیل سامانه بخار نشان داد که افت راندمان حرارتی، بازیافت ناقص کندانس، نوسانات فشار بخار و فرسودگی بخشی از خطوط انتقال از مهم‌ترین عوامل افزایش مصرف انرژی در کارخانه هستند. همچنین بررسی عملکرد تبخیرکننده‌ها نشان داد که کاهش راندمان انتقال حرارت و رسوب‌گذاری در سطوح حرارتی می‌تواند مصرف ویژه بخار را به‌صورت قابل توجهی افزایش دهد. از سوی دیگر، تحلیل الگوی مصرف آب بیانگر آن بود که نبود سامانه‌های بازچرخانی و کنترل غیردقیق جریان آب موجب افزایش شدت مصرف آب در خطوط شست‌وشوی مواد اولیه و تجهیزات شده است.

نتایج مدل‌سازی چندهدفه پژوهش نشان داد که مدیریت همزمان آب و بخار نسبت به کنترل جداگانه این دو متغیر، کارایی بیشتری در کاهش مصرف منابع دارد. بهبود نرخ بازیافت کندانس، استفاده از بازچرخانی مرحله‌ای آب، کنترل هوشمند فشار بخار و افزایش راندمان حرارتی فرآیند از مهم‌ترین راهکارهای مؤثر در کاهش شدت مصرف منابع شناخته شدند. اجرای مدل پیشنهادی موجب کاهش مصرف ویژه بخار، افت شدت مصرف آب، افزایش راندمان حرارتی و بهبود شاخص‌های بهره‌وری سبز شد. ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری سبز نشان داد که کاهش مصرف منابع علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، اثر مستقیمی بر بهبود عملکرد زیست‌محیطی کارخانه دارد. کاهش مصرف بخار موجب افت مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌های حرارتی شده و کاهش مصرف آب نیز سبب کاهش حجم پساب صنعتی و محدود شدن فشار بر منابع آبی شده است. این نتایج نشان می‌دهد که توسعه سامانه‌های مدیریت پایدار منابع در صنایع غذایی می‌تواند همزمان منافع اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند. از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر، ارائه چارچوبی یکپارچه برای تحلیل داده‌های واقعی صنعتی و مدل‌سازی همزمان مصرف آب و بخار در صنایع فرآوری گوجه است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که صرفاً بر تحلیل تئوریک یا بررسی جداگانه مصرف منابع تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش ارتباط متقابل میان آب، بخار و راندمان فرآیندی به‌صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت. این ویژگی موجب شده است که مدل پیشنهادی قابلیت کاربرد عملی در محیط واقعی کارخانه را داشته باشد.

بر اساس یافته‌های تحقیق، پیشنهاد می‌شود کارخانه‌های تولید رب گوجه و کنسرو به سمت استفاده از سامانه‌های پایش هوشمند انرژی، بازیافت حرارت، بازچرخانی آب فرآیندی و کنترل دیجیتال بخار حرکت کنند تا امکان کاهش شدت مصرف منابع و افزایش بهره‌وری صنعتی فراهم شود. همچنین توسعه مدل‌های داده‌محور مبتنی بر تحلیل لحظه‌ای فرآیند می‌تواند زمینه لازم را برای طراحی کارخانه‌های کم‌مصرف و پایدار در صنایع غذایی آینده فراهم کند. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شاخص‌های بهره‌وری سبز و مدل‌سازی چندهدفه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف آب و بخار در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد و مبنایی برای توسعه راهبردهای صنعتی پایدار در واحدهای فرآوری حرارتی فراهم سازد.

منابع

- [1] Pimentel D, Burgess M. Food energy and society. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2020.
- [2] Morar M, Agachi PS. Review Integrated analysis of water and energy saving opportunities in industrial processes. Comput Aided Chem Eng. 2021;50:1449-1454.
- [3] Djekic I, Miocinovic J, Tomasevic I, Smigic N, Tomic N. Environmental life-cycle assessment of tomato ketchup production. Sustainability. 2021;13(3):1381.
- [4] Yildiz H, Capraz O, Arici M. Water footprint assessment of food manufacturing industries in Turkey. J Clean Prod. 2022;330:129880.
- [5] Singh P, Shrivastava V, Kumar A. Water conservation and wastewater minimization in food processing industries through cleaner production techniques. J Water Process Eng. 2021;40:101978.
- [6] Azizi K, Jafari SM, Mirzaei H. Energy consumption analysis and optimization in tomato paste processing industries. Energy Rep. 2022;8:11467-11479.
- [7] Noya I, González-García S, Bacenetti J, Fiala M, Moreira MT. Environmental impacts of tomato production and processed tomato products A review. J Clean Prod. 2020;268:122121.
- [8] Khoshnevisan B, Rafiee S, Omid M, Mousazadeh H. Environmental impact assessment of tomato and tomato paste production using life cycle assessment. J Clean Prod. 2020;247:119112.
- [9] Rahnama M, Rezaei S, Allahyari MS. Sustainable resource management in agro-food industries based on green productivity indicators. Sustain Prod Consum. 2023;36:401-414.
- [10] Zhang H, Li Y, Chen B. Multi-objective optimization of industrial steam systems considering energy efficiency and environmental impacts. Energy Convers Manag. 2021;245:114611.

- [11] Vakiloroya V, Samali B, Fakhar A. Industrial steam systems optimization for energy efficiency improvement A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2022;159:112201.
- [12] Mirzapour Al-e-hashem SMJ, Malekly H, Aryanezhad MB. A multi-objective robust optimization model for sustainable supply chain management in food industries. *Int J Prod Econ.* 2021;234:108042.