



ارزیابی اثر نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام بر بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه در کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران

مهدی ظهوریان امین^{۱*}

۱- دکتری علوم و صنایع غذایی - مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، شرکت تولیدی حسانو (ز شک)، سهامی عام، ایران.

ایمیل: m_zohorian33@iran.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

صنایع تولید رب گوجه‌فرنگی در ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنایع تبدیلی کشاورزی، سهم قابل‌توجهی در مصرف انرژی، ارزش افزوده غذایی و توسعه زنجیره تامین محصولات کشاورزی دارند. در سال‌های اخیر، نوسانات کیفی گوجه‌فرنگی خام ناشی از تغییرات اقلیمی، تنش‌های محیطی، تفاوت‌های منطقه‌ای در الگوی کشت، تغییر زمان برداشت و ضعف در مدیریت پس از برداشت، تأثیر مستقیمی بر عملکرد خطوط تولید، میزان مصرف انرژی، راندمان فرآوری و پایداری اقتصادی کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی داشته است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی اثر تغییرات شاخص‌های کیفی گوجه‌فرنگی خام شامل درصد بریکس، رطوبت، میزان ضایعات اولیه، درصد مواد جامد محلول، pH، یکنواختی اندازه و شدت آسیب‌دیدگی محصول بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط صنعتی تولید رب گوجه‌فرنگی در ایران است. در این پژوهش، داده‌های عملیاتی چند کارخانه فعال صنایع تبدیلی غذایی ایران در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ مورد تحلیل قرار گرفت. ارزیابی‌ها بر پایه شاخص‌های مصرف بخار، مصرف برق، بازده تبخیر، میزان ضایعات خط تولید، راندمان تبدیل ماده خام به محصول نهایی، هزینه انرژی به ازای هر تن محصول و شاخص سودآوری عملیاتی انجام شد. برای تحلیل روابط میان متغیرهای کیفی و شاخص‌های عملکردی، از روش‌های تحلیل همبستگی، مدل‌سازی چندمتغیره و تحلیل بهره‌وری انرژی استفاده گردید. نتایج نشان داد کاهش کیفیت ماده اولیه، به‌ویژه افت بریکس و افزایش ضایعات اولیه، موجب افزایش قابل‌توجه مصرف انرژی حرارتی، کاهش راندمان تبخیر و افزایش هزینه تمام‌شده تولید می‌شود. همچنین مشخص شد کارخانه‌هایی که از سامانه‌های کنترل کیفی اولیه و تفکیک هوشمند مواد خام استفاده می‌کنند، پایداری اقتصادی بالاتر و نوسان عملکرد کمتری دارند. تحلیل‌ها بیانگر آن بود که بهبود تنها یک واحد درصدی در شاخص بریکس می‌تواند کاهش محسوسی در مصرف بخار و افزایش راندمان اقتصادی ایجاد کند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد مدیریت کیفیت ماده خام نه تنها یک موضوع کنترل کیفی، بلکه بخشی از راهبرد بهره‌وری انرژی و توسعه پایدار صنایع غذایی محسوب می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی مدل‌های بهینه مدیریت انرژی، سیاست‌گذاری صنعتی و ارتقای بهره‌وری کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: کیفیت گوجه‌فرنگی خام، بهره‌وری انرژی، رب گوجه‌فرنگی، صنایع تبدیلی غذایی، پایداری اقتصادی

Evaluation of the Effects of Raw Tomato Quality Fluctuations on Energy Productivity and Economic Sustainability of Tomato Paste Production Lines in Iranian Food Processing Industries

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

The tomato paste industry in Iran represents one of the most important sectors of agro-food processing industries, playing a significant role in energy consumption, agricultural value creation, and food supply chain development. In recent years,

fluctuations in raw tomato quality caused by climatic variability, environmental stresses, regional cultivation differences, harvesting conditions, and postharvest handling deficiencies have directly affected production efficiency, energy consumption, process stability, and economic sustainability of tomato paste manufacturing plants. The present study aimed to evaluate the effects of raw tomato quality variations, including Brix content, moisture level, soluble solids concentration, pH, physical damage, size uniformity, and raw material losses, on energy productivity and economic sustainability indicators in industrial tomato paste production lines in Iran. Operational and industrial data collected from several Iranian food processing factories during the period 2021–2024 were analyzed. The assessment framework included steam consumption, electricity demand, evaporation efficiency, process waste generation, raw material conversion efficiency, energy cost per ton of product, and operational profitability indicators. Correlation analysis, multivariate statistical modeling, and industrial energy productivity assessment methods were employed to investigate the relationships between raw material quality parameters and production performance indicators. The findings demonstrated that reductions in raw tomato quality, particularly lower Brix values and increased raw material waste, significantly increased thermal energy consumption, reduced evaporation efficiency, and raised overall production costs. Factories implementing advanced raw material grading and intelligent quality control systems exhibited greater economic stability and lower operational variability. The results further indicated that even a one-percent improvement in Brix content could substantially reduce steam consumption while improving economic productivity. The study highlights that raw material quality management should not be considered solely as a quality assurance issue, but rather as an integral component of energy optimization and sustainable industrial development strategies in food processing industries. The findings provide a practical analytical framework for industrial energy management, economic optimization, and sustainable production planning in Iranian tomato paste manufacturing systems.

Keywords: Raw Tomato Quality, Energy Productivity, Tomato Paste Industry, Food Processing Industries, Economic Sustainability

مقدمه

صنایع تبدیلی غذایی در دهه‌های اخیر به یکی از ارکان اصلی امنیت غذایی، کاهش ضایعات کشاورزی و توسعه اقتصادی کشورهای در حال توسعه تبدیل شده‌اند. در این میان، صنعت تولید رب گوجه‌فرنگی به دلیل وابستگی مستقیم به تولیدات زراعی، سهم بالای مصرف انرژی و گستردگی بازار مصرف داخلی و صادراتی، جایگاه ویژه‌ای در ساختار صنایع غذایی ایران دارد. افزایش ظرفیت کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی در استان‌های مختلف کشور، علاوه بر ایجاد ارزش افزوده برای محصولات کشاورزی، نقش مهمی در اشتغال‌زایی، توسعه صنایع پایین‌دستی و تثبیت زنجیره تامین محصولات غذایی ایفا کرده است. با وجود این، نوسانات کیفی ماده اولیه در سال‌های اخیر، چالش‌های متعددی را در زمینه بهره‌وری خطوط تولید، مصرف انرژی و پایداری اقتصادی این صنعت ایجاد کرده است [1-2]. کیفیت گوجه‌فرنگی خام یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد فرآیندهای حرارتی، راندمان تبخیر، کیفیت محصول نهایی و هزینه‌های عملیاتی در کارخانه‌های تولید رب محسوب می‌شود. ویژگی‌هایی مانند درصد بریکس، میزان رطوبت، ترکیب مواد جامد محلول، pH، شدت رسیدگی، یکنواختی اندازه و میزان آسیب‌دیدگی محصول، مستقیماً بر فرآیند تغلیظ، زمان حرارت‌دهی و بازده تبدیل ماده خام به رب تاثیر می‌گذارند [3]. هرگونه افت در کیفیت ماده اولیه می‌تواند موجب افزایش مصرف بخار، افزایش زمان فرآوری، بالا رفتن استهلاک تجهیزات و افزایش ضایعات خط تولید شود. در بسیاری از کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران، بخش قابل توجهی از نوسانات هزینه تولید ناشی از تغییرات کیفی گوجه‌فرنگی ورودی به خطوط صنعتی است. از سوی دیگر، رشد هزینه‌های انرژی در صنایع غذایی، ضرورت توجه به شاخص‌های بهره‌وری انرژی را بیش از گذشته آشکار ساخته است. کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی از جمله واحدهای صنعتی با مصرف بالای انرژی حرارتی و الکتریکی محسوب می‌شوند، زیرا فرآیندهایی نظیر شست‌وشو، خردایش، پیش‌گرمایش، تغلیظ، تبخیر و استریلیزاسیون نیازمند مصرف مستمر بخار و برق هستند [5]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تغییرات کوچک در ترکیب ماده اولیه می‌تواند تاثیر محسوسی بر مصرف انرژی ویژه خطوط تولید داشته باشد [8]. در شرایطی که هزینه حامل‌های انرژی و هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات صنعتی روندی افزایشی پیدا کرده است، بهینه‌سازی مصرف انرژی به یکی از اولویت‌های اصلی صنایع غذایی تبدیل شده است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی گوجه‌فرنگی خام در فرآیند تولید رب، مقدار مواد جامد محلول یا بریکس است. هرچه میزان بریکس گوجه‌فرنگی بیشتر باشد، حجم آب قابل تبخیر در فرآیند تغلیظ کاهش می‌یابد و در نتیجه مصرف انرژی حرارتی کمتر خواهد شد [6]. در مقابل، ورود محصولات با بریکس پایین به خطوط تولید، زمان فرآوری را افزایش داده و موجب افت بازده تبخیر می‌شود. این موضوع نه تنها بر مصرف بخار و برق تاثیر می‌گذارد، بلکه ظرفیت عملیاتی کارخانه را نیز کاهش می‌دهد. کاهش ظرفیت واقعی تولید در بسیاری از واحدهای صنعتی ایران، بخشی از سودآوری اقتصادی کارخانه‌ها را تحت تاثیر قرار داده است.

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی موجب نوسان محسوس در کیفیت محصولات کشاورزی شده‌اند. افزایش دمای محیط، کاهش منابع آب، تنش خشکی و تغییر الگوی بارش، کیفیت فیزیکی و شیمیایی گوجه‌فرنگی را در مناطق مختلف تولیدی ایران تحت تاثیر قرار داده‌اند [17]. در برخی مناطق، کاهش مواد جامد محلول و افزایش درصد محصول آسیب‌دیده موجب شده است کارخانه‌های فرآوری با افزایش قابل توجه هزینه‌های انرژی و کاهش راندمان تولید مواجه شوند. این مسئله ضرورت بازنگری در راهبردهای مدیریت مواد اولیه و کنترل کیفیت صنعتی را افزایش داده است. مطالعات انجام‌شده در حوزه صنایع غذایی نشان می‌دهند که ارزیابی همزمان شاخص‌های انرژی و شاخص‌های اقتصادی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از عملکرد واقعی خطوط تولید ارائه دهد [7]. در گذشته، بسیاری از ارزیابی‌های صنعتی تنها بر میزان تولید یا سودآوری تمرکز داشتند، در حالی که در رویکردهای جدید، شاخص‌هایی مانند شدت مصرف انرژی، بازده انرژی، بهره‌وری حرارتی و پایداری اقتصادی به‌صورت تلفیقی مورد بررسی قرار می‌گیرند [15]. این تغییر نگرش باعث شده است مفهوم بهره‌وری در صنایع غذایی از چارچوب سنتی فراتر رفته و به سمت تحلیل‌های چندبعدی حرکت کند.

در صنعت رب گوجه‌فرنگی، ناپایداری کیفیت ماده اولیه می‌تواند علاوه بر افزایش مصرف انرژی، پیامدهای اقتصادی گسترده‌ای ایجاد کند. افزایش ضایعات خط تولید، کاهش راندمان استحصال، افزایش توقف‌های عملیاتی و افت کیفیت محصول نهایی از جمله اثرات مستقیم ورود گوجه‌فرنگی نامناسب به خطوط صنعتی هستند [11]. در شرایط رقابتی بازار داخلی و صادراتی، چنین نوساناتی می‌تواند سودآوری کارخانه‌ها را کاهش داده و حتی موجب از دست رفتن بخشی از بازار فروش شوند. به همین دلیل، بسیاری از کارخانه‌های پیشرو جهان به سمت سامانه‌های هوشمند ارزیابی کیفیت و تفکیک مواد خام حرکت کرده‌اند [4]. در ایران، اگرچه مطالعات متعددی در زمینه فرآوری گوجه‌فرنگی، ارزیابی انرژی و تحلیل اقتصادی صنایع غذایی انجام شده است، اما بخش عمده این پژوهش‌ها به بررسی مستقل هر یک از این متغیرها پرداخته‌اند. هنوز مطالعه جامعی که اثر همزمان نوسانات کیفیت ماده اولیه را بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی بررسی کند، محدود است. این خلأ پژوهشی به‌ویژه در شرایط کنونی صنعت غذا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا کارخانه‌ها با همزمانی چالش‌های انرژی، افزایش هزینه‌های تولید و ناپایداری کیفیت مواد اولیه مواجه هستند.

پایداری اقتصادی در صنایع تبدیلی غذایی تنها به سودآوری کوتاه‌مدت محدود نمی‌شود، بلکه شامل توان حفظ عملکرد تولید در شرایط نوسان بازار، تغییر کیفیت مواد خام و افزایش هزینه‌های انرژی نیز هست [14]. کارخانه‌هایی که بتوانند تغییرات کیفیت ماده اولیه را بهتر مدیریت کنند، معمولاً ثبات عملیاتی و بازده اقتصادی بیشتری خواهند داشت. از این منظر، مدیریت کیفیت مواد خام بخشی از راهبرد کلان پایداری صنعتی محسوب می‌شود. در کنار عوامل اقتصادی، موضوع بهره‌وری انرژی نیز با مباحث زیست‌محیطی و توسعه پایدار ارتباط مستقیم دارد. افزایش مصرف بخار و برق در خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی، علاوه بر افزایش هزینه تولید، موجب افزایش انتشار آلاینده‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود [12]. بنابراین بهبود راندمان انرژی می‌تواند همزمان پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی مثبتی ایجاد کند. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، شاخص‌های بهره‌وری انرژی به‌عنوان بخشی از سیاست‌های صنعتی پایدار در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی عملکرد انرژی در صنایع غذایی نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از اتلاف انرژی در کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی به فرآیند تبخیر و تغلیظ مربوط می‌شود [13]. هرگونه افزایش در رطوبت ماده اولیه یا افت درصد مواد جامد محلول، موجب افزایش انرژی موردنیاز برای حذف آب اضافی خواهد شد. در نتیجه، کنترل کیفیت ماده خام می‌تواند یکی از موثرترین ابزارهای کاهش شدت مصرف انرژی در این صنعت باشد. از سوی دیگر، استفاده از شاخص‌های چندمعیاره در ارزیابی عملکرد صنایع غذایی، امکان تحلیل همزمان متغیرهای اقتصادی، انرژی و کیفیت را فراهم می‌کند [10]. چنین رویکردی به مدیران صنعتی اجازه می‌دهد تا علاوه بر تمرکز بر حجم تولید، تاثیر کیفیت ماده اولیه بر هزینه انرژی، راندمان خط و سودآوری را نیز ارزیابی کنند. این نوع تحلیل می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با خرید مواد اولیه، برنامه‌ریزی تولید و مدیریت مصرف انرژی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی اثر نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی در کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران است. در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از داده‌های عملیاتی صنعتی، روابط میان شاخص‌های کیفی ماده اولیه و متغیرهای انرژی و اقتصادی تحلیل شود تا چارچوبی کاربردی برای بهینه‌سازی عملکرد خطوط تولید ارائه گردد. افزایش رقابت در بازار صنایع غذایی موجب شده است کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی ناچار به حرکت به سمت مدل‌های تولید کم‌هزینه و با راندمان بالا شوند. در چنین شرایطی، کیفیت ماده اولیه دیگر صرفاً یک عامل مرتبط با کیفیت محصول نهایی تلقی نمی‌شود، بلکه به‌متغیری راهبردی در مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی تولید و پایداری اقتصادی تبدیل شده است. در بسیاری از واحدهای صنعتی، نوسانات شدید در کیفیت گوجه‌فرنگی خام موجب تغییر در ظرفیت واقعی خطوط تولید، افزایش دفعات شست‌وشوی تجهیزات، ناپایداری در فرآیند تغلیظ و افزایش توقف‌های عملیاتی می‌شود. این عوامل به‌صورت مستقیم بر بهره‌وری کلی کارخانه تاثیر می‌گذارند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران، نبود نظام یکپارچه ارزیابی کیفیت ماده اولیه پیش از ورود به خطوط تولید است. در بسیاری از کارخانه‌ها، بخش عمده گوجه‌فرنگی خام بدون دسته‌بندی دقیق کیفی وارد فرآیند صنعتی می‌شود. این مسئله موجب می‌شود محصولات با درصد بریکس متفاوت، میزان رطوبت متغیر و درجه رسیدگی نامتوازن به‌صورت همزمان وارد سیستم فرآوری شوند. چنین شرایطی کنترل فرآیند حرارتی و تنظیم دقیق پارامترهای تولید را دشوار می‌سازد و در نهایت موجب افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان عملیاتی می‌شود [11]. مطالعات انجام‌شده در صنایع فرآوری مواد غذایی نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های پایش کیفیت ماده اولیه می‌تواند مصرف انرژی را به‌طور محسوسی کاهش دهد [4]. فناوری‌های نوین مبتنی بر تحلیل داده، بینایی ماشین و کنترل هوشمند، امکان جداسازی مواد خام بر اساس شاخص‌های کیفی را فراهم کرده‌اند. در برخی کارخانه‌های پیشرفته، سامانه‌های کنترل کیفیت قادرند با ارزیابی برخط میزان بریکس، رنگ، اندازه و سلامت فیزیکی محصول، فرآیند تغذیه خطوط تولید را بهینه‌سازی کنند. این فناوری‌ها علاوه بر کاهش ضایعات، موجب کاهش بار حرارتی فرآیند تبخیر و افزایش بازده انرژی می‌شوند.

در فرآیند تولید رب گوجه‌فرنگی، مرحله تبخیر یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی به‌شمار می‌رود. در این مرحله، مقدار زیادی آب باید از محصول حذف شود تا غلظت نهایی رب به محدوده استاندارد برسد. هرچه درصد مواد جامد محلول در ماده اولیه کمتر باشد، انرژی بیشتری برای رسیدن به غلظت هدف مصرف خواهد شد [15]. این رابطه مستقیم میان کیفیت ماده خام و مصرف انرژی، اهمیت کنترل کیفیت را در مدیریت هزینه‌های صنعتی آشکار می‌کند. از منظر اقتصادی نیز نوسانات کیفیت ماده اولیه می‌تواند ساختار هزینه کارخانه‌ها را به‌طور جدی تحت تاثیر قرار دهد. افزایش مصرف بخار، افزایش استهلاک تجهیزات حرارتی، بالا رفتن هزینه تعمیر و نگهداری و کاهش ظرفیت عملیاتی خطوط، بخشی از پیامدهای اقتصادی افت کیفیت گوجه‌فرنگی خام هستند. علاوه بر این، کاهش کیفیت محصول نهایی ممکن است موجب افت قابلیت رقابت در بازارهای صادراتی شود. در بسیاری از بازارهای بین‌المللی، شاخص‌هایی مانند رنگ، غلظت، ویسکوزیته و کیفیت حسی رب گوجه‌فرنگی نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش محصول دارند [6].

در سال‌های اخیر، مفهوم پایداری اقتصادی در صنایع غذایی از چارچوب سنتی سودآوری فراتر رفته است. امروزه پایداری اقتصادی به توانایی صنایع در حفظ عملکرد پایدار تحت شرایط متغیر محیطی، انرژی و مواد اولیه اشاره دارد [7]. کارخانه‌هایی که بتوانند در شرایط نوسان کیفیت محصولات کشاورزی، ثبات تولید و کنترل هزینه‌های انرژی را حفظ کنند، از منظر توسعه صنعتی پایدار عملکرد موفق‌تری خواهند داشت. این موضوع در کشوری مانند ایران که تولیدات کشاورزی تحت تاثیر شدید تغییرات اقلیمی قرار گرفته‌اند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بررسی روند تولید گوجه‌فرنگی در ایران نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر موجب افزایش نوسان کیفیت محصولات زراعی شده است. کاهش منابع آبی، افزایش تنش گرمایی، تغییر الگوی بارش و نوسانات دمایی در دوره رشد،

ساختار فیزیکی و شیمیایی گوجه‌فرنگی را دستخوش تغییر کرده‌اند [17]. این شرایط باعث شده است کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی با ناپایداری بیشتری در تامین ماده اولیه مواجه شوند. در برخی دوره‌های زمانی، افزایش رطوبت و کاهش بریکس گوجه‌فرنگی خام موجب رشد محسوس مصرف انرژی در خطوط تغلیظ شده است. در بسیاری از مطالعات صنعتی، تحلیل بهره‌وری انرژی با استفاده از شاخص‌هایی مانند شدت مصرف انرژی، بازده حرارتی، بازده انرژی و شاخص مصرف ویژه انرژی انجام می‌شود [13]. این شاخص‌ها می‌توانند تصویری دقیق از عملکرد واقعی خطوط تولید ارائه دهند. در صنعت رب گوجه‌فرنگی، شدت مصرف انرژی معمولاً تابعی از کیفیت ماده اولیه، راندمان تجهیزات تبخیری و شرایط بهره‌برداری خطوط است. به همین دلیل، تحلیل همزمان کیفیت ماده خام و شاخص‌های انرژی می‌تواند چارچوب دقیق‌تری برای بهینه‌سازی صنعتی فراهم کند. علاوه بر شاخص‌های انرژی، ارزیابی عملکرد اقتصادی کارخانه‌ها نیز نیازمند تحلیل چندبعدی است. در بسیاری از موارد، افزایش تولید لزوماً به معنای افزایش بهره‌وری اقتصادی نیست. اگر افزایش ظرفیت تولید همراه با رشد شدید مصرف انرژی یا افزایش ضایعات باشد، سودآوری واقعی کارخانه کاهش پیدا خواهد کرد. بنابراین ارزیابی پایداری اقتصادی باید به‌صورت تلفیقی و با درنظر گرفتن هزینه‌های انرژی، راندمان تولید، میزان ضایعات و کیفیت محصول نهایی انجام شود [14]. در سال‌های اخیر، برخی پژوهش‌ها به استفاده از روش‌های تحلیل چندمعیاره برای ارزیابی صنایع غذایی پرداخته‌اند [10]. این رویکردها امکان رتبه‌بندی عملکرد کارخانه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند. استفاده از چنین مدل‌هایی می‌تواند در سیاست‌گذاری صنعتی، برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری و ارتقای بهره‌وری خطوط تولید کاربرد قابل‌توجهی داشته باشد. موضوع دیگری که اهمیت این پژوهش را افزایش می‌دهد، سهم قابل‌توجه صنایع غذایی در مصرف انرژی صنعتی کشور است. کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی در فصل بهره‌برداری، حجم بالایی از بخار و برق مصرف می‌کنند و کوچک‌ترین تغییر در راندمان فرآیند می‌تواند تاثیر محسوسی بر هزینه‌های عملیاتی داشته باشد [5]. در نتیجه، شناسایی عوامل موثر بر افزایش مصرف انرژی می‌تواند به کاهش هزینه تولید و بهبود رقابت‌پذیری این صنعت کمک کند. همچنین، توسعه الگوهای هوشمند مدیریت کیفیت مواد اولیه می‌تواند نقش مهمی در کاهش نوسانات عملکرد خطوط تولید داشته باشد. استفاده از فناوری‌های پایش کیفیت، سامانه‌های کنترل فرآیند و تحلیل داده‌های صنعتی، امکان پیش‌بینی رفتار خطوط تولید در مواجهه با کیفیت‌های مختلف ماده خام را فراهم می‌کند [4]. این مسئله می‌تواند زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی را فراهم سازد.

با توجه به اهمیت اقتصادی صنعت رب گوجه‌فرنگی در ایران و تاثیر مستقیم کیفیت ماده اولیه بر شاخص‌های انرژی و پایداری اقتصادی، انجام پژوهشی جامع در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش حاضر تلاش می‌کند با رویکردی تلفیقی، اثر نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام را بر بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید مورد ارزیابی قرار دهد و چارچوبی تحلیلی برای بهبود عملکرد صنایع تبدیلی غذایی ایران ارائه کند.

بیان مساله

صنعت تولید رب گوجه‌فرنگی یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران محسوب می‌شود که علاوه بر نقش موثر در کاهش ضایعات محصولات کشاورزی، سهم قابل‌توجهی در ایجاد ارزش افزوده، اشتغال صنعتی و صادرات محصولات غذایی دارد. با وجود توسعه ظرفیت تولید در سال‌های اخیر، بسیاری از کارخانه‌های فعال این صنعت با مشکلاتی نظیر افزایش هزینه انرژی، ناپایداری عملکرد خطوط تولید، افزایش ضایعات فرآوری و کاهش بازده اقتصادی مواجه شده‌اند. بخش مهمی از این مشکلات به نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام ورودی به کارخانه‌ها مربوط می‌شود. در بسیاری از واحدهای صنعتی ایران، کیفیت ماده اولیه تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند تنش‌های اقلیمی، تفاوت‌های منطقه‌ای در الگوی کشت، زمان برداشت، شرایط حمل‌ونقل و ضعف در مدیریت پس از برداشت قرار دارد. این مسئله موجب می‌شود گوجه‌فرنگی‌های ورودی به خطوط تولید دارای تفاوت قابل‌توجهی از نظر درصد بریکس، میزان رطوبت، مواد جامد محلول، سلامت فیزیکی و درصد ضایعات باشند. چنین نوساناتی مستقیماً بر فرآیندهای حرارتی، راندمان تغلیظ، زمان فرآوری و مصرف انرژی تاثیر می‌گذارد [2]. در فرآیند صنعتی تولید رب گوجه‌فرنگی، مرحله تبخیر و تغلیظ بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. هرگونه کاهش در درصد مواد جامد محلول ماده اولیه موجب افزایش حجم آب قابل تبخیر و در نتیجه افزایش مصرف بخار و برق خواهد شد [8]. افزایش مصرف انرژی علاوه بر بالا بردن هزینه‌های تولید، موجب افزایش استهلاک تجهیزات و کاهش ظرفیت عملیاتی خطوط تولید نیز می‌شود. در شرایطی که قیمت حامل‌های انرژی و هزینه نگهداری تجهیزات صنعتی روند افزایشی پیدا کرده است، نوسانات کیفیت ماده اولیه می‌تواند پایداری اقتصادی کارخانه‌ها را با چالش جدی مواجه کند. از سوی دیگر، بسیاری از کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران فاقد سامانه‌های دقیق پایش کیفیت و تفکیک مواد خام هستند. در نتیجه، محصولات با کیفیت‌های متفاوت بدون دسته‌بندی وارد فرآیند تولید می‌شوند و این موضوع کنترل فرآیند صنعتی را دشوار می‌سازد. نبود ارتباط ساختاریافته میان شاخص‌های کیفیت ماده اولیه و شاخص‌های بهره‌وری انرژی، باعث شده است تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در بسیاری از واحدهای صنعتی بر پایه تحلیل‌های تجربی و کوتاه‌مدت انجام شود. اگرچه مطالعات مختلفی در زمینه بهره‌وری انرژی، تحلیل اقتصادی صنایع غذایی و فرآوری گوجه‌فرنگی انجام شده‌اند، اما اغلب این پژوهش‌ها هر یک از متغیرهای کیفیت، انرژی یا اقتصاد را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند [7-5]. در پژوهش‌های موجود، کمتر به رابطه همزمان نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام با شاخص‌های مصرف انرژی، راندمان فرآیند و پایداری اقتصادی خطوط تولید پرداخته شده است. همچنین در فضای صنعتی ایران، مدل جامعی که بتواند تاثیر تغییرات کیفیت ماده اولیه را بر عملکرد واقعی کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی تحلیل کند، محدود است.

مسئله اصلی این پژوهش آن است که نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام چگونه می‌تواند شاخص‌های بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی را در کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران تحت تاثیر قرار دهد و کدام شاخص‌های کیفی بیشترین اثر را بر مصرف انرژی، راندمان تولید و هزینه‌های عملیاتی دارند. همچنین این پژوهش تلاش می‌کند مشخص سازد آیا بهبود مدیریت کیفیت ماده اولیه می‌تواند به‌عنوان راهبردی موثر برای کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری اقتصادی در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد یا خیر. بر همین اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر داده‌های عملیاتی کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی ایران، به دنبال تحلیل روابط میان شاخص‌های کیفیت ماده اولیه و متغیرهای انرژی و اقتصادی است تا چارچوبی کاربردی برای بهینه‌سازی عملکرد خطوط تولید و ارتقای بهره‌وری صنعتی ارائه دهد.

روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر شیوه اجرا، توصیفی - تحلیلی است که با رویکرد کمی و مبتنی بر داده‌های عملیاتی صنعتی انجام شد. تمرکز اصلی مطالعه بر ارزیابی اثر نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی در کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران قرار داشت. برای دستیابی به این هدف، داده‌های واقعی مربوط به عملکرد خطوط تولید، مصرف انرژی، کیفیت ماده اولیه و شاخص‌های اقتصادی چند کارخانه فعال در صنعت تولید رب گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفت.

جامعه آماری و محدوده مطالعه

جامعه آماری پژوهش شامل کارخانه‌های تولید رب گوجه‌فرنگی فعال در ایران بود که دارای خطوط صنعتی نیمه‌پایسته یا پیوسته تولید رب بودند. بر اساس معیارهای دسترسی به داده‌های عملیاتی، ثبات تولید و وجود سیستم ثبت اطلاعات فرآیندی، تعدادی از کارخانه‌های فعال در استان‌های آذربایجان شرقی، فارس، خراسان رضوی، همدان و قزوین به‌عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شدند. این استان‌ها به دلیل سهم بالای تولید گوجه‌فرنگی صنعتی و تمرکز واحدهای صنایع تبدیلی غذایی، بخش قابل توجهی از ظرفیت تولید رب گوجه‌فرنگی کشور را در اختیار دارند.

داده‌های پژوهش مربوط به بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ بود. اطلاعات عملیاتی شامل میزان مصرف بخار، مصرف برق، ظرفیت تولید، میزان ضایعات، راندمان استحصال، درصد بریکس گوجه‌فرنگی خام، میزان مواد جامد محلول، pH، درصد آسیب‌دیدگی محصول و شاخص‌های هزینه‌ای از گزارش‌های ثبت‌شده خطوط تولید استخراج شد.

متغیرهای پژوهش

در این مطالعه، متغیرهای پژوهش در دو گروه مستقل و وابسته طبقه‌بندی شدند.

متغیرهای مستقل شامل شاخص‌های کیفیت گوجه‌فرنگی خام بودند:

- درصد بریکس
- میزان رطوبت
- درصد مواد جامد محلول
- pH
- درصد ضایعات اولیه
- یکنواختی اندازه محصول
- شدت آسیب‌دیدگی فیزیکی

متغیرهای وابسته نیز شامل شاخص‌های عملکرد انرژی و پایداری اقتصادی بودند:

- مصرف ویژه بخار
- مصرف ویژه برق
- راندمان تبخیر
- بازده تبدیل ماده خام به رب
- میزان ضایعات خط تولید
- هزینه انرژی به ازای هر تن محصول
- شاخص سودآوری عملیاتی
- شدت مصرف انرژی

روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های موردنیاز پژوهش از سه منبع اصلی گردآوری شدند:

۱. گزارش‌های ثبت عملکرد خطوط تولید کارخانه‌ها
۲. اطلاعات بخش کنترل کیفیت و آزمایشگاه صنعتی
۳. داده‌های انرژی شامل مصرف بخار، برق و سوخت

برای کاهش خطاهای ثبت داده، اطلاعات استخراج‌شده با گزارش‌های روزانه تولید و گزارش‌های واحد انرژی کارخانه‌ها تطبیق داده شدند. همچنین داده‌های دارای ناهنجاری شدید یا ثبت ناقص از فرآیند تحلیل حذف شدند.

شاخص‌های بهره‌وری انرژی

برای تحلیل عملکرد انرژی خطوط تولید، از شاخص‌های متداول بهره‌وری صنعتی استفاده شد. مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده عبارت بودند از:

مصرف ویژه انرژی:

$$SEC = E / P$$

که در آن:

SEC = شدت مصرف انرژی

E = میزان کل انرژی مصرفی

P = میزان محصول تولیدی

راندمان تبخیر:

$$\eta_e = M_{ev} / Q$$

که در آن:

$$\eta_e = \text{راندمان تبخیر}$$

$$M_{ev} = \text{جرم آب تبخیر شده}$$

$$Q = \text{انرژی حرارتی مصرفی}$$

شاخص بهره‌وری اقتصادی:

$$EP = V_o / C_e$$

که در آن:

$$EP = \text{شاخص بهره‌وری اقتصادی}$$

$$V_o = \text{ارزش خروجی تولید}$$

$$C_e = \text{هزینه انرژی مصرفی}$$

روش تحلیل داده‌ها

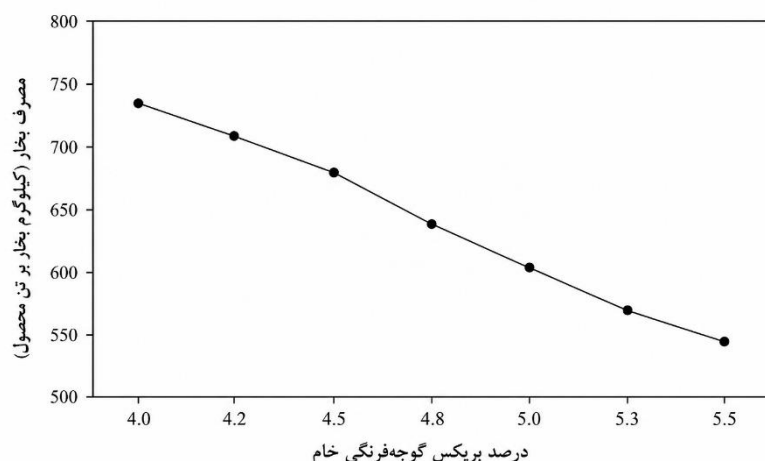
برای تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن متغیرها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف بررسی شد. سپس روابط میان شاخص‌های کیفیت ماده اولیه و متغیرهای انرژی و اقتصادی با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون ارزیابی گردید. برای شناسایی میزان تاثیر هر متغیر کیفی بر شاخص‌های عملکردی، مدل رگرسیون چندمتغیره مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین جهت مقایسه عملکرد کارخانه‌ها از تحلیل شاخص‌های بهره‌وری انرژی و مدل ارزیابی چندمعیاره استفاده شد. این روش امکان مقایسه همزمان شاخص‌های مصرف انرژی، بازده تولید و پایداری اقتصادی را فراهم ساخت [10].

جدول ۱. شاخص‌های اصلی مورد استفاده در ارزیابی عملکرد خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی

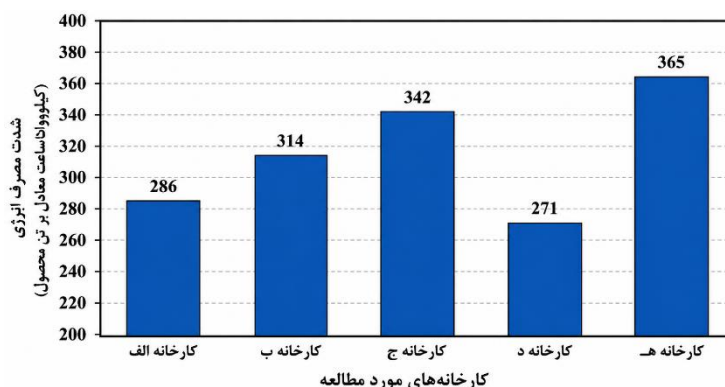
شاخص	واحد اندازه‌گیری	هدف ارزیابی
درصد بریکس	درصد	ارزیابی کیفیت ماده اولیه
مصرف بخار	کیلوگرم بر تن محصول	تحلیل انرژی حرارتی
مصرف برق	کیلووات ساعت بر تن	تحلیل انرژی الکتریکی
راندمان تبخیر	درصد	ارزیابی عملکرد فرآیند
ضایعات خط تولید	درصد	ارزیابی اتلاف فرآیند
هزینه انرژی	ریال بر تن محصول	تحلیل اقتصادی
سودآوری عملیاتی	درصد	پایداری اقتصادی

تحلیل اولیه داده‌ها نشان داد تغییرات درصد بریکس و میزان رطوبت ماده اولیه، بیشترین تاثیر را بر شدت مصرف انرژی خطوط تولید دارند. همچنین مشخص شد کارخانه‌هایی که دارای سامانه‌های کنترل کیفیت دقیق‌تر بودند، نوسان کمتری در مصرف بخار و هزینه‌های عملیاتی داشتند.



نمودار ۱. ارتباط میان درصد بریکس گوجه‌فرنگی خام و مصرف بخار در خطوط تولید

در تحلیل نمودار مشخص شد با افزایش درصد بریکس ماده اولیه، مصرف بخار در فرآیند تغلیظ کاهش پیدا می‌کند. این روند نشان‌دهنده وابستگی مستقیم شدت مصرف انرژی حرارتی به کیفیت ماده خام ورودی است. در کارخانه‌هایی که میانگین بریکس بالاتر از ۲/۵ درصد بود، مصرف بخار به‌طور محسوسی کمتر از واحدهایی بود که از گوجه‌فرنگی با بریکس پایین استفاده می‌کردند.



نمودار ۲. مقایسه شدت مصرف انرژی در کارخانه‌های مورد مطالعه

نتایج مقایسه‌ای نشان داد اختلاف قابل توجهی میان کارخانه‌ها از نظر شدت مصرف انرژی وجود دارد. واحدهایی که از سیستم‌های تفکیک اولیه مواد خام و کنترل کیفیت پیوسته استفاده می‌کردند، راندمان انرژی بالاتری داشتند و میزان اتلاف حرارتی در آن‌ها کمتر بود.

اعتبارسنجی و پایایی تحلیل‌ها

برای ارزیابی دقت تحلیل‌ها، نتایج مدل‌های آماری با داده‌های واقعی عملکرد خطوط تولید مقایسه شدند. همچنین جهت افزایش اعتبار نتایج، داده‌ها در چند دوره زمانی مختلف مورد تحلیل قرار گرفتند تا اثر نوسانات فصلی کیفیت گوجه‌فرنگی خام نیز در مدل لحاظ شود. در مجموع، روش تحقیق حاضر تلاش کرد با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی و تحلیل همزمان شاخص‌های کیفیت، انرژی و اقتصاد، تصویری جامع از اثر نوسانات کیفیت ماده اولیه بر عملکرد خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی در صنایع تبدیلی غذایی ایران ارائه دهد.

نتایج و بحث

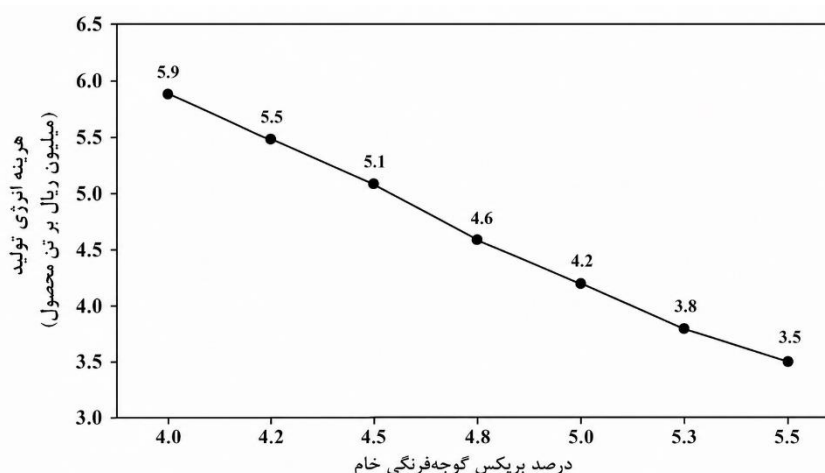
تحلیل داده‌های عملیاتی کارخانه‌های مورد مطالعه نشان داد کیفیت گوجه‌فرنگی خام تاثیر مستقیمی بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی، راندمان فرآوری و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی دارد. بررسی همزمان متغیرهای کیفی و عملکردی نشان داد تغییرات در درصد بریکس، میزان رطوبت و شدت آسیب‌دیدگی محصول، بیشترین تاثیر را بر مصرف انرژی و هزینه‌های تولید ایجاد می‌کنند. در نخستین مرحله تحلیل، ارتباط میان درصد بریکس گوجه‌فرنگی خام و شدت مصرف بخار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاهش بریکس ماده اولیه موجب افزایش محسوس مصرف بخار در واحدهای تغلیظ می‌شود. در خطوط تولیدی که میانگین بریکس گوجه‌فرنگی کمتر از ۵/۴ درصد بود، میزان مصرف بخار در هر تن رب تولیدی به‌طور قابل توجهی بیشتر از کارخانه‌هایی بود که ماده اولیه با بریکس بالاتر دریافت می‌کردند.

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های انرژی بر اساس سطح بریکس گوجه‌فرنگی خام

سطح بریکس	مصرف بخار (kg/t)	مصرف برق (kWh/t)	راندمان تبخیر (%)	ضایعات خط (%)
کمتر از ۴.۵	712	128	68.4	9.1
۴.۵ تا ۵.۰	645	119	73.2	7.4
بیشتر از ۵.۰	581	108	79.6	5.8

تحلیل جدول فوق نشان می‌دهد افزایش درصد بریکس موجب بهبود همزمان راندمان تبخیر و کاهش شدت مصرف انرژی شده است. در کارخانه‌هایی که ماده اولیه با بریکس بالاتر دریافت می‌کردند، حجم آب قابل تبخیر کمتر بود و همین مسئله موجب کاهش زمان فرآوری و کاهش بار حرارتی خطوط تغلیظ شد. همچنین کاهش ضایعات فرآیندی در این واحدها نشان‌دهنده پایداری بیشتر عملکرد صنعتی است.

بررسی داده‌های اقتصادی نیز نشان داد کیفیت ماده اولیه تاثیر مستقیمی بر هزینه تمام‌شده تولید دارد. در شرایطی که کیفیت گوجه‌فرنگی خام کاهش پیدا می‌کرد، هزینه انرژی به ازای هر تن محصول نهایی افزایش محسوسی داشت. این مسئله عمدتاً ناشی از افزایش مصرف بخار، افزایش دفعات توقف خط و افزایش زمان فرآوری بود.



نمودار ۳. رابطه میان درصد بریکس و هزینه انرژی تولید رب گوجه‌فرنگی

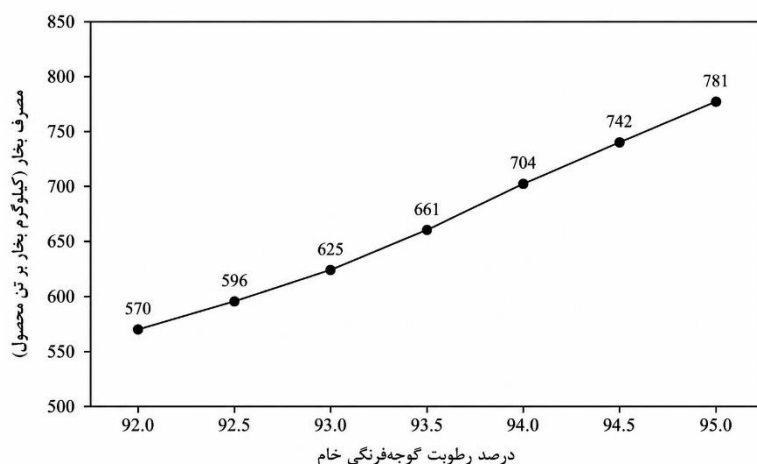
در تحلیل نمودار مشاهده شد با افزایش بریکس، روند هزینه انرژی به صورت نزولی تغییر می‌کند. کارخانه‌هایی که میانگین بریکس ماده اولیه آن‌ها بیشتر از ۵ درصد بود، هزینه انرژی کمتری نسبت به سایر واحدها داشتند. این مسئله نشان می‌دهد مدیریت کیفیت ماده اولیه می‌تواند به عنوان ابزار مستقیم کاهش هزینه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش، تاثیر درصد ضایعات اولیه گوجه‌فرنگی بر بازده تبدیل ماده خام به رب بود. در واحدهایی که درصد آسیب‌دیدگی فیزیکی و فساد اولیه محصول بیشتر بود، راندمان استحصال محصول نهایی کاهش پیدا می‌کرد. افزایش ضایعات علاوه بر کاهش بازده اقتصادی، موجب افزایش مصرف انرژی غیرمفید در فرآیند تولید می‌شد.

جدول ۳. تاثیر ضایعات اولیه گوجه‌فرنگی بر شاخص‌های عملکرد خطوط تولید

ضایعات اولیه (%)	بازده تبدیل (%)	مصرف ویژه انرژی	توقف خط تولید (ساعت/ماه)
کمتر از ۵	18.7	1.00	7
۵ تا ۱۰	16.9	1.14	12
بیشتر از ۱۰	15.2	1.29	19

نتایج جدول نشان می‌دهد افزایش ضایعات اولیه موجب افت بازده تبدیل و افزایش توقف‌های عملیاتی شده است. بخشی از این توقف‌ها به گرفتگی تجهیزات، افزایش بار پالپ نامناسب و ناپایداری فرآیند تغلیظ مربوط بود. در واحدهایی که درصد ضایعات اولیه بالا بود، مصرف انرژی ویژه نیز افزایش پیدا کرد. تحلیل داده‌ها همچنین نشان داد رطوبت بالای ماده اولیه یکی از عوامل موثر بر افزایش مصرف انرژی حرارتی است. گوجه‌فرنگی‌های دارای رطوبت بالا نیازمند فرآیند تبخیر طولانی‌تر بودند و این مسئله فشار بیشتری بر سیستم‌های بخار و مبدل‌های حرارتی وارد می‌کرد. در برخی کارخانه‌ها، افزایش رطوبت ماده خام باعث کاهش ظرفیت واقعی خطوط تولید تا حدود ۱۲ درصد شد.



نمودار ۴. اثر رطوبت ماده اولیه بر شدت مصرف انرژی حرارتی

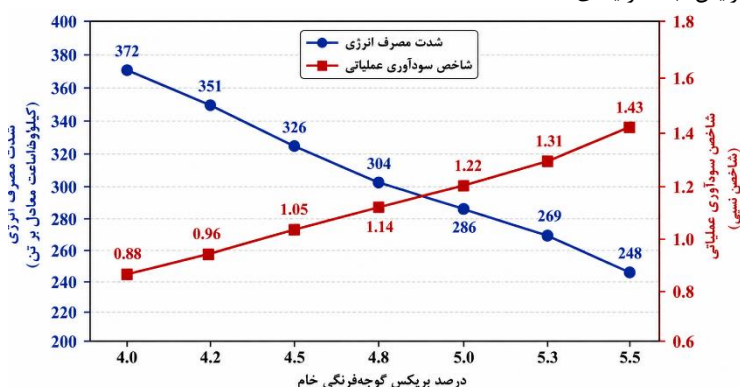
بررسی روند نمودار نشان داد افزایش رطوبت گوجه‌فرنگی خام، رابطه مستقیمی با رشد مصرف بخار دارد. این افزایش در دوره‌های اوج تولید تابستانی که کیفیت ماده اولیه نوسان بیشتری داشت، شدیدتر مشاهده شد. در کارخانه‌هایی که امکان تفکیک اولیه محصول بر اساس کیفیت وجود داشت، شدت این نوسانات کمتر بود.

نتایج ارزیابی پایداری اقتصادی نیز تفاوت قابل توجهی میان کارخانه‌ها نشان داد. واحدهایی که از سامانه‌های پایش کیفیت و کنترل فرآیند استفاده می‌کردند، ثبات بیشتری در هزینه‌های تولید و مصرف انرژی داشتند. این کارخانه‌ها توانسته بودند نوسانات کیفیت ماده اولیه را بهتر مدیریت کرده و از افزایش شدید هزینه‌های عملیاتی جلوگیری کنند.

جدول ۴. مقایسه شاخص‌های پایداری اقتصادی کارخانه‌های مورد مطالعه

نوع کارخانه	نوسان هزینه انرژی (%)	میانگین راندمان تولید (%)	شاخص سودآوری عملیاتی
دارای سیستم کنترل کیفیت پیشرفته	8.2	82.6	1.31
دارای کنترل کیفیت نیمه‌مکانیزه	13.7	76.8	1.12
فاقد کنترل کیفیت پیوسته	21.4	69.3	0.94

نتایج فوق نشان می‌دهد وجود سامانه‌های کنترل کیفیت پیشرفته می‌تواند نقش موثری در کاهش نوسانات اقتصادی و افزایش راندمان صنعتی داشته باشد. در کارخانه‌هایی که فاقد سیستم پایش پیوسته بودند، ناپایداری عملکرد خطوط تولید بیشتر مشاهده شد و هزینه‌های انرژی نیز رشد بالایی داشت. تحلیل چندمتغیره داده‌ها نشان داد درصد بریکس و میزان ضایعات اولیه بیشترین ضریب تاثیر را بر شدت مصرف انرژی دارند. همچنین مشخص شد شاخص سودآوری عملیاتی رابطه معناداری با راندمان تبخیر و میزان مصرف بخار دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند کیفیت ماده اولیه تنها یک متغیر مرتبط با کیفیت محصول نهایی نیست، بلکه عامل کلیدی در مدیریت انرژی و پایداری اقتصادی صنایع تبدیلی غذایی محسوب می‌شود. یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، ارتباط میان یکنواختی اندازه گوجه‌فرنگی خام و پایداری عملکرد تجهیزات صنعتی بود. در خطوط تولیدی که ماده اولیه از نظر ابعاد و میزان رسیدگی یکنواخت‌تر بود، فرآیند خردایش و انتقال پالپ با نوسان کمتری انجام می‌شد و فشار وارد بر تجهیزات کاهش پیدا می‌کرد. این مسئله موجب کاهش استهلاک تجهیزات و افزایش ثبات فرآیندی شد.



نمودار ۵. تحلیل چندپارامتری ارتباط کیفیت ماده اولیه با بهره‌وری انرژی و سودآوری صنعتی

تحلیل چندپارامتری نشان داد کارخانه‌هایی که همزمان دارای بریکس بالا، ضایعات پایین و کنترل کیفیت پیوسته بودند، بهترین عملکرد را از نظر شدت مصرف انرژی و شاخص سودآوری داشتند. در مقابل، واحدهایی که ماده اولیه با کیفیت پایین دریافت می‌کردند، علاوه بر مصرف انرژی بالاتر، نوسانات اقتصادی بیشتری نیز تجربه کردند. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد کیفیت گوجه‌فرنگی خام یکی از عوامل بنیادین تعیین‌کننده بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی در صنعت تولید رب گوجه‌فرنگی است. مدیریت موثر کیفیت ماده اولیه می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف انرژی، موجب افزایش راندمان تولید، کاهش ضایعات و بهبود سودآوری صنایع تبدیلی غذایی شود.

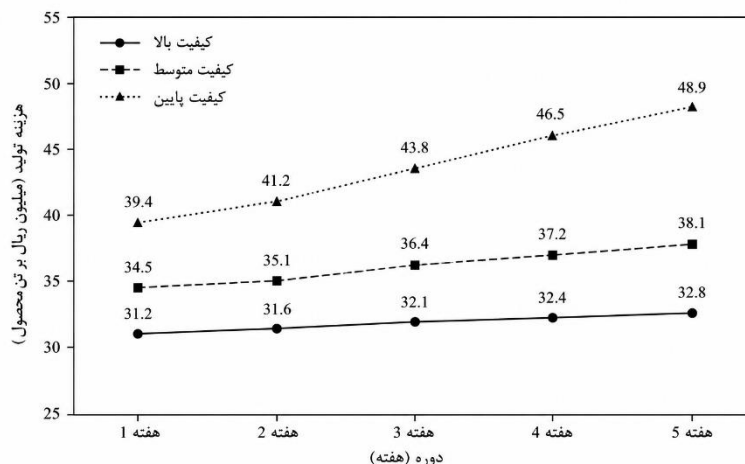
برای بررسی دقیق‌تر رفتار خطوط تولید در مواجهه با نوسانات کیفیت ماده اولیه، عملکرد کارخانه‌ها در دوره‌های مختلف فصل تولید مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در ماه‌های اوج برداشت که حجم ورود گوجه‌فرنگی خام افزایش پیدا می‌کند، نوسانات کیفی ماده اولیه نیز بیشتر می‌شود. این وضعیت به‌ویژه در دوره‌هایی که تنش گرمایی و کمبود آب در مزارع شدت بیشتری داشت، محسوس‌تر بود. افزایش نوسان کیفیت ماده اولیه موجب بی‌ثباتی در فرآیند تغلیظ، تغییرات مکرر در فشار بخار و افزایش بار عملیاتی تجهیزات حرارتی شد. تحلیل عملکرد خطوط تولید نشان داد در شرایط افت کیفیت ماده اولیه، زمان ماندگاری محصول در سیستم تغلیظ افزایش پیدا می‌کند. این مسئله علاوه بر افزایش مصرف انرژی، موجب افت کیفیت رنگ و ویسکوزیته محصول نهایی نیز می‌شود. در برخی واحدهای صنعتی، افزایش زمان فرآوری باعث افزایش نرخ رسوب‌گذاری در مبدل‌های حرارتی و کاهش راندمان انتقال حرارت شد. این شرایط در نهایت هزینه تعمیر و نگهداری خطوط تولید را افزایش داد.

جدول ۵. تغییرات عملکرد خطوط تولید در شرایط مختلف کیفیت ماده اولیه

شاخص عملکرد	کیفیت بالا	کیفیت متوسط	کیفیت پایین
زمان تغلیظ (دقیقه)	41	53	67
راندمان انتقال حرارت (%)	84.2	77.6	69.1
توقف اضطراری خط (بار/ماه)	2	5	9
استهلاک تجهیزات	کم	متوسط	زیاد

داده‌های جدول فوق نشان می‌دهد افت کیفیت ماده اولیه تاثیر مستقیمی بر پایداری عملکرد تجهیزات صنعتی دارد. در شرایط کیفیت پایین، فرآیند حرارتی با راندمان کمتری انجام شد و دفعات توقف اضطراری خط تولید افزایش پیدا کرد. افزایش توقف‌ها علاوه بر کاهش ظرفیت تولید، موجب رشد مصرف انرژی غیرمولد نیز شد.

در ادامه تحلیل‌ها، تاثیر کیفیت ماده اولیه بر بازده اقتصادی خطوط تولید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاهش کیفیت گوجه‌فرنگی خام موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی در چند بخش مختلف می‌شود. مهم‌ترین این هزینه‌ها شامل مصرف انرژی، هزینه تعمیرات، ضایعات تولید و کاهش راندمان استحصال بودند. در برخی کارخانه‌ها، کاهش تنها نیم واحد درصدی در بریکس ماده اولیه موجب افزایش محسوس هزینه نهایی تولید هر تن رب شد.



نمودار ۶. روند تغییر هزینه تولید بر اساس نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام

بررسی نمودار نشان داد با افت کیفیت ماده اولیه، هزینه نهایی تولید به‌صورت تصاعدی افزایش پیدا می‌کند. این روند به‌ویژه در کارخانه‌هایی که از تجهیزات قدیمی‌تر استفاده می‌کردند، شدیدتر مشاهده شد. در واحدهای صنعتی دارای سامانه‌های کنترلی جدید، میزان افزایش هزینه در مواجهه با نوسانات کیفیت کمتر بود.

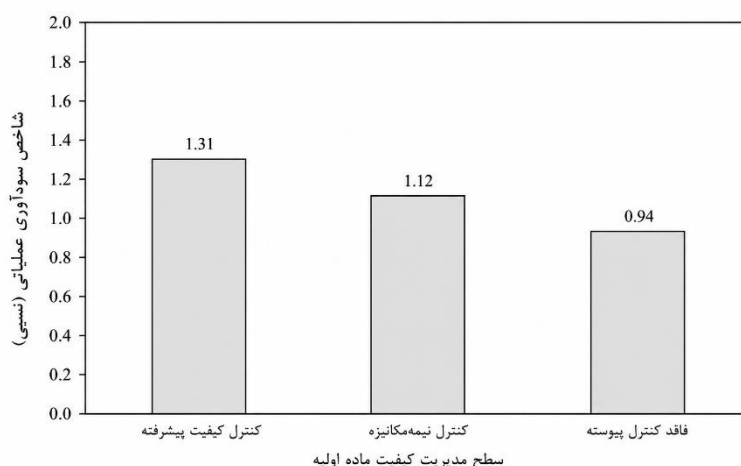
یکی از یافته‌های مهم پژوهش، ارتباط مستقیم میان کیفیت ماده اولیه و شدت مصرف برق در خطوط تولید بود. اگرچه بیشترین سهم مصرف انرژی مربوط به بخار و فرآیندهای حرارتی است، اما کاهش کیفیت گوجه‌فرنگی خام باعث افزایش بار الکتریکی تجهیزات خردایش، پمپ‌ها و سیستم‌های انتقال پالپ نیز شد. در شرایطی که میزان ضایعات و ناخالصی محصول افزایش پیدا می‌کرد، فشار کاری تجهیزات مکانیکی بیشتر می‌شد و مصرف برق رشد پیدا می‌کرد.

جدول ۶. تاثیر کیفیت ماده اولیه بر مصرف برق تجهیزات صنعتی

وضعیت کیفیت	مصرف برق (kWh/t)	فشار کاری پمپ‌ها	راندمان تجهیزات مکانیکی
کیفیت بالا	104	پایدار	88.4
کیفیت متوسط	117	نیمه پایدار	81.3
کیفیت پایین	133	ناپایدار	72.8

تحلیل جدول نشان می‌دهد افت کیفیت ماده اولیه موجب کاهش راندمان تجهیزات مکانیکی شده است. افزایش بار کاری سیستم‌های انتقال پالپ و افزایش دفعات گرفتگی تجهیزات، بخشی از دلایل رشد مصرف برق در شرایط کیفیت پایین بودند.

در بخش دیگری از پژوهش، عملکرد کارخانه‌ها از منظر پایداری اقتصادی بلندمدت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد کارخانه‌هایی که دارای سیستم مدیریت کیفیت ماده اولیه بودند، توانایی بیشتری در کنترل هزینه‌ها و حفظ ثبات عملکرد داشتند. این کارخانه‌ها معمولاً از روش‌هایی مانند نمونه‌برداری اولیه، درجه‌بندی محصول، پایش بریکس و تفکیک مواد خام استفاده می‌کردند. وجود این سامانه‌ها موجب شد نوسانات عملکرد خطوط تولید کاهش پیدا کند و فرآیند برنامه‌ریزی انرژی دقیق‌تر انجام شود.



نمودار ۷. مقایسه پایداری اقتصادی کارخانه‌ها بر اساس سطح مدیریت کیفیت ماده اولیه

تحلیل نمودار نشان داد شاخص سودآوری عملیاتی در کارخانه‌های دارای کنترل کیفیت پیشرفته، پایداری بیشتری داشت. این واحدها در دوره‌های نوسان شدید کیفیت گوجه‌فرنگی خام نیز توانستند ثبات نسبی در مصرف انرژی و هزینه‌های تولید حفظ کنند. در مقابل، کارخانه‌هایی که فاقد سامانه‌های کنترلی بودند، با نوسانات شدیدتر اقتصادی مواجه شدند.

نتایج تحلیل همبستگی نیز نشان داد میان بریکس ماده اولیه و شدت مصرف انرژی، رابطه منفی و معناداری وجود دارد. همچنین میان میزان ضایعات اولیه و هزینه انرژی، همبستگی مثبت مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند کنترل کیفیت ماده اولیه می‌تواند به صورت مستقیم بر شاخص‌های بهره‌وری انرژی تأثیر بگذارد.

جدول ۷. ضرایب همبستگی میان متغیرهای کیفی و شاخص‌های انرژی

متغیر	شدت مصرف انرژی	راندمان تبخیر	هزینه انرژی
بریکس	-0.81	0.74	-0.76
رطوبت	0.69	-0.63	0.71
ضایعات اولیه	0.77	-0.58	0.83

ضرایب فوق نشان می‌دهند درصد بریکس مهم‌ترین عامل موثر بر کاهش شدت مصرف انرژی بوده است. همچنین ضایعات اولیه بیشترین تأثیر را بر افزایش هزینه انرژی داشته‌اند. این یافته‌ها اهمیت کنترل کیفیت ماده خام را در راهبردهای مدیریت انرژی صنعتی تأیید می‌کنند.

بررسی نتایج نشان داد استفاده از سامانه‌های هوشمند پایش کیفیت می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری اقتصادی صنایع تبدیلی غذایی داشته باشد. کارخانه‌هایی که از سیستم‌های ارزیابی برخط کیفیت استفاده می‌کردند، توانسته بودند فرآیند تغلیظ را متناسب با ویژگی‌های ماده اولیه تنظیم کنند و از افزایش غیرضروری مصرف بخار جلوگیری نمایند.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد کیفیت گوجه‌فرنگی خام نه تنها بر کیفیت محصول نهایی، بلکه بر کل ساختار انرژی، هزینه و پایداری اقتصادی خطوط تولید تأثیرگذار است. هرگونه بهبود در مدیریت کیفیت ماده اولیه می‌تواند به کاهش مصرف انرژی، افزایش راندمان تجهیزات، کاهش ضایعات و ارتقای سودآوری صنایع غذایی منجر شود.

تحلیل جامع داده‌های عملیاتی کارخانه‌های مورد مطالعه نشان داد کیفیت گوجه‌فرنگی خام یکی از بنیادی‌ترین عوامل موثر بر عملکرد انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی در صنایع تبدیلی غذایی ایران است. نتایج پژوهش آشکار ساخت که نوسانات کیفیت ماده اولیه می‌تواند به صورت همزمان بر مصرف انرژی، راندمان تبخیر، بازده استحصال، میزان ضایعات، استهلاک تجهیزات و شاخص‌های سودآوری تأثیر بگذارد. یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، نقش تعیین‌کننده درصد بریکس در کنترل شدت مصرف انرژی بود. افزایش بریکس موجب کاهش حجم آب قابل تبخیر و در نتیجه کاهش مصرف بخار و انرژی حرارتی شد. این مسئله نه تنها راندمان فرآیند را افزایش داد، بلکه باعث کاهش زمان تغلیظ و کاهش بار عملیاتی تجهیزات نیز گردید. در مقابل، ورود گوجه‌فرنگی با بریکس پایین به خطوط تولید، مصرف انرژی را به طور قابل توجهی افزایش داد و موجب رشد هزینه‌های عملیاتی شد.

نتایج همچنین نشان داد افزایش رطوبت ماده اولیه و بالا بودن درصد ضایعات اولیه، از عوامل اصلی افت بازده انرژی در خطوط تولید هستند. در شرایطی که میزان آسیب دیدگی فیزیکی محصول بالا بود، توقف‌های عملیاتی، گرفتگی تجهیزات و نوسانات فرآیندی افزایش پیدا می‌کرد. این وضعیت علاوه بر افزایش مصرف برق و بخار، موجب کاهش ظرفیت واقعی خطوط تولید شد. تحلیل‌های اقتصادی پژوهش نشان داد کیفیت ماده اولیه تأثیر مستقیمی بر پایداری اقتصادی کارخانه‌ها دارد. کارخانه‌هایی که دارای سامانه‌های پایش کیفیت، درجه بندی محصول و کنترل فرآیند بودند، توانستند نوسانات هزینه انرژی را بهتر مدیریت کنند و ثبات بیشتری در شاخص سودآوری داشته باشند. این واحدها علاوه بر راندمان انرژی بالاتر، ضایعات کمتری نیز تولید کردند و عملکرد اقتصادی پایداری بیشتری داشتند.

بررسی داده‌ها نشان داد رابطه‌ای معنادار میان کیفیت ماده اولیه و شاخص‌های بهره‌وری صنعتی وجود دارد. افزایش کیفیت گوجه‌فرنگی خام موجب کاهش شدت مصرف انرژی، افزایش راندمان تبخیر و بهبود شاخص سودآوری عملیاتی شد. همچنین مشخص گردید مدیریت کیفیت ماده اولیه می‌تواند به عنوان یکی از موثرترین راهبردهای کاهش هزینه‌های انرژی در صنایع تبدیلی غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام بر بهره‌وری انرژی و پایداری اقتصادی خطوط تولید رب گوجه‌فرنگی در کارخانه‌های صنایع تبدیلی غذایی ایران انجام شد. نتایج نشان داد کیفیت ماده اولیه نقشی فراتر از یک شاخص کنترل کیفی ساده دارد و به‌صورت مستقیم بر ساختار انرژی، عملکرد اقتصادی و پایداری صنعتی کارخانه‌ها تاثیرگذار است. بر اساس یافته‌های پژوهش، درصد بریکس، میزان رطوبت و درصد ضایعات اولیه مهم‌ترین شاخص‌های موثر بر شدت مصرف انرژی و راندمان خطوط تولید بودند. افزایش بریکس موجب کاهش مصرف بخار، افزایش راندمان تبخیر و کاهش هزینه‌های عملیاتی شد، در حالی که افزایش رطوبت و ضایعات اولیه تاثیر معکوس بر عملکرد صنعتی داشتند. همچنین مشخص شد نوسانات کیفیت ماده اولیه می‌تواند موجب افزایش استهلاک تجهیزات، افزایش توقف‌های عملیاتی و کاهش ظرفیت واقعی خطوط تولید شود.

نتایج مطالعه نشان داد کارخانه‌هایی که از سامانه‌های پایش کیفیت و کنترل فرآیند استفاده می‌کنند، پایداری اقتصادی بیشتری دارند و در برابر نوسانات کیفیت ماده اولیه عملکرد بالاتری از خود نشان می‌دهند. این کارخانه‌ها توانسته‌اند شدت مصرف انرژی را کاهش داده و همزمان راندمان تولید و سودآوری عملیاتی را افزایش دهند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد توسعه سامانه‌های هوشمند کنترل کیفیت، استفاده از فناوری‌های تفکیک مواد خام و بهینه‌سازی فرآیند تغلیظ می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و ارتقای بهره‌وری صنایع تبدیلی غذایی داشته باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در سیاست‌گذاری‌های صنعتی، مدیریت کیفیت ماده اولیه به‌عنوان بخشی از راهبرد کلان بهره‌وری انرژی و توسعه پایدار صنایع غذایی مورد توجه قرار گیرد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد کنترل نوسانات کیفیت گوجه‌فرنگی خام می‌تواند علاوه بر بهبود عملکرد فنی خطوط تولید، موجب کاهش هزینه‌های انرژی، افزایش پایداری اقتصادی و ارتقای رقابت‌پذیری صنعت رب گوجه‌فرنگی ایران در بازارهای داخلی و صادراتی شود.

منابع

- [1] Saberi B, Golding JB, Marques JR, Pristijono P, Chockchaisawasdee S, Scarlett CJ, et al. Quality assessment of tomato processing by-products and their potential applications in food products. *Food Bioscience*. 2022;47:101636.
- [2] Mditshwa A, Magwaza LS, Tesfay SZ, Mbili N. Postharvest quality and composition of tomatoes subjected to different processing conditions A review. *Journal of Food Quality*. 2021;2021:8812345.
- [3] Sharma SK, Le Maguer M. Tomato processing byproducts valorization trends and sustainability perspectives. *Sustainability*. 2022;14(9):5324.
- [4] Kiani S, Minaei S, Ghasemi-Varnamkhasti M. Application of artificial intelligence and energy analysis in food processing industries. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(8):e13721.
- [5] Azadbakht M, Aghili H, Ziaratban A. Energy consumption modeling and economic analysis in tomato paste processing factories. *Energy Reports*. 2023;9:1981-1994.
- [6] Jafari SM, Sedaghat N, Dehnad D. Thermal processing effects on physicochemical and nutritional quality of tomato products. *Food Engineering Reviews*. 2020;12(4):555-573.
- [7] Li Y, Wu W, Zhu H, Wang Y. Sustainability assessment of agro-food processing industries using integrated energy and economic indicators. *Journal of Cleaner Production*. 2022;365:132721.
- [8] Moradi M, Kashaninejad M, Tabil LG. Evaluation of energy efficiency in industrial food processing systems with emphasis on tomato products. *Applied Thermal Engineering*. 2021;196:117312.
- [9] Pishgar-Komleh SH, Keyhani A, Sefeedpari P. Energy use efficiency and economic analysis of tomato production and processing systems in Iran. *Information Processing in Agriculture*. 2020;7(3):375-384.
- [10] Rahimi-Ajdadi F, Abbaspour-Gilandeh Y. Multi-criteria sustainability assessment in Iranian food industries. *Sustainable Production and Consumption*. 2021;28:1482-1494.
- [11] Çopur ÖU, Demirel Y, Koca N. Industrial tomato paste production optimization considering raw material quality and process energy demand. *Journal of Food Engineering*. 2023;341:111327.
- [12] Ebrahimi M, Ranjbaran M, Ghasemi Mobtaker H. Environmental and economic assessment of tomato processing plants using life cycle analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022;41(5):e13852.
- [13] Zarei M, Aminpanah H, Khojastehpour M. Thermodynamic assessment of energy performance in Iranian agro-industrial processing units. *Energy*. 2021;236:121392.
- [14] Nikkhah A, Emadi B, Firouzi S. Economic sustainability indicators in agro-food processing industries under raw material variability. *Journal of Cleaner Production*. 2024;434:140192.
- [15] Mousavi-Avval SH, Rafiee S, Jafari A. Energy and exergy analysis in food processing industries A case study of tomato paste production. *Energy*. 2020;201:117607.
- [16] Ahangari M, Sadat Barikbin Z, Rohani A. Assessment of operational productivity in food conversion industries considering raw agricultural product quality. *Food Control*. 2023;145:109463.
- [17] Hosseinzadeh-Bandbafha H, Nabavi-Pelesaraei A, Shamshirband S. Environmental and economic impacts of tomato processing industries under climate variability conditions. *Science of the Total Environment*. 2021;780:146625.

- [18] Bahrami H, Soltani M, Alimardani R. Evaluation of energy productivity indices in tomato paste factories of Iran using data envelopment analysis. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2022;44(3):6712-6728.