مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هشتم، شماره۸۷، مهر ۱۴۰۵
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای فرآوری و نگهداری محصولات کشاورزی

الناز موسوی[۱]

[۱] گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده

عملیات رطوبت‌زدایی و فرآوری حرارتی محصولات باغی به عنوان یکی از انرژی‌برترین حلقه‌های زنجیره پس از برداشت، همواره با چالش موازنه میان مصرف توان الکتریکی و حفظ ویژگی‌های بیوشیمیایی و ارگانولپتیک بافت‌های گیاهی مواجه است. هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی، ارزیابی کمی و بهینه‌سازی شاخص‌های مصرف ویژه انرژی (SEC) و نرخ مصرف انرژی به ازای آب حذف‌شده (ECR) در فرآیندهای نگهداری محصولات کشاورزی با محوریت برش‌های سیب رقم فوجی و زرد لبنانی از دیدگاه تلفیقی مهندسی سیستم‌ها و مهندسی برق است. روش‌شناسی این تحقیق مبتنی بر تحلیل داده‌های تجربی حاصل از آزمون‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی در دو رژیم همرفتی هوای گرم (دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، با بارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ گرم به مدت ۷ ساعت) و رژیم گرمایش دی‌الکتریک مایکروویو (سطوح توان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات با ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر همراه با پیش‌تیمار فراصوت) است. یافته‌های تجربی نشان داد که در سامانه‌های همرفتی هوای گرم، افزایش بار ورودی خشک‌کن از ۲۵۰ به ۵۰۰ گرم در دمای ۵۰ درجه سلسیوس با سرشکن کردن تلفات ثابت حرارتی جداره‌ها، شاخص ECR را از ۵٫۵۷ به ۲٫۸۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب تبخیرشده تقلیل می‌دهد که حاکی از بهبود ۴۸٫۳ درصدی راندمان ترمودینامیکی فرآیند است؛ هرچند افزایش دما به ۷۰ درجه سلسیوس به دلیل تشدید تلفات نشت حرارتی، این شاخص را به ۸٫۷۶ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم افزایش می‌دهد. در مقابل، بهره‌گیری از گرمایش تشعشعی مایکروویو در توان ۳۰۰ وات همراه با پیش‌تیمار فراصوت، زمان فرآیند رطوبت‌زدایی را به ۳۱٫۵۵ دقیقه کاهش داده و مصرف ویژه انرژی را به ۳٫۴۲ مگاژول بر کیلوگرم (معادل ۰٫۹۵ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم) می‌رساند. نتیجه‌گیری می‌شود که گذار از سامانه‌های مقاومتی پیوسته به رژیم‌های ترکیبی پالس‌محور و استفاده از درایوهای دور متغیر فرکانسی (VFD) در بخش دمش هوا، قادر است شدت مصرف انرژی صنایع تبدیلی را تا بیش از ۶۰ درصد کاهش داده و شاخص‌های کیفی شامل احتباس اسید اسکوربیک و ثبات شاخص رنگی (ΔE) را به صورت بهینه صیانت نماید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی مصرف انرژی، مصرف ویژه انرژی (SEC)، نرخ مصرف انرژی (ECR)، مهندسی صنایع غذایی، گرمایش مایکروویو، درایو فرکانس متغیر، خشک‌کردن همرفتی، پایش بار الکتریکی.

مقدمه

صنایع تبدیلی و فرآوری پس از برداشت محصولات کشاورزی نقشی راهبردی در امنیت غذایی، کاهش ضایعات زیستی و ارتقای ارزش افزوده بخش کشاورزی ایفا می‌کنند؛ با این حال، ماهیت فرآیندهای رطوبت‌زدایی و نگهداری حرارتی، این بخش را به یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان توان الکتریکی و سوخت‌های فسیلی در شبکه صنعتی بدل ساخته است (مونتس و همکاران، ۲۰۲۱). بحران فزاینده ناترازی انرژی، ضرورت بهینه‌سازی مصرف الکتریسیته در موتورهای الکتریکی محرک، دمنده‌ها و المنت‌های حرارتی سامانه‌های آب‌گیری را دوچندان نموده است. مسئله بنیادین در واحدهای متعارف فرآوری مواد غذایی، حاکمیت رویکردهای کنترل سنتی حلقه باز (On/Off) و عدم تطابق تقاضای ترمودینامیکی بافت با پروفایل تزریق توان الکتریکی است؛ امری که نه تنها منجر به مصرف مازاد برق در فاز افت نرخ رطوبت‌زدایی می‌گردد، بلکه به واسطه تنش‌های حرارتی مداوم، موجبات قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی، کاراملیزاسیون، تجزیه حرارتی ویتامین ث (اسید اسکوربیک) و زوال پلی‌فنل‌های کل را در محصولاتی حساس نظیر سیب رقم فوجی فراهم می‌آورد (مونسالوز و شوئرمان، ۲۰۲۳). اهمیت این پژوهش در همگرایی رشته‌های مهندسی صنایع (از منظر تخصیص بهینه منابع، مدیریت زنجیره انرژی و طراحی پیکره‌بندی بهینه بار) و مهندسی برق (از جنبه کنترل توان اکتیو، مدیریت سرعت موتورهای دمنده و پایش آنلاین مصرف ویژه انرژی) نهفته است تا بتوان فرآیند را در نقطه بهینه کارکرد پارتو قرار داد. شکاف دانشی برجسته در ادبیات موجود، تفکیک غیرسازنده پژوهش‌های ترمودینامیکی و تغذیه‌ای از مباحث مدیریت توان الکتریکی است؛ به نحوی که اغلب مطالعات صنایع غذایی صرفاً تغییرات وزن و ترکیبات بیوشیمیایی را رصد نموده و تلفات موتورها، ضریب بار الکتریکی و نرخ مصرف واقعی بر حسب کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب تبخیرشده را مسکوت گذاشته‌اند، در حالی که در مطالعات مهندسی انرژی نیز ماهیت ناهمگن و متغیر ماده بیولوژیکی نادیده گرفته شده است (رسولی شربیانی و همکاران، ۲۰۲۱). هدف این تحقیق جامع، پر کردن این شکاف با تلفیق داده‌های تجربی واقعی استخراج‌شده از سامانه‌های الکتریکی همرفتی و دی‌الکتریک، اندازه‌گیری رفتار ترموفیزیکی بافت سیب، ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های SEC و ECR و ارائه یک الگوی مدیریت بار بهینه برای کاهش هزینه‌های پیک دیماند کارخانجات فرآوری با حفظ جامعیت شاخص‌های سلامت و بافت محصول است (تقوی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳).

مبانی نظری

مدل‌سازی مصرف انرژی در فرآوری حرارتی مواد غذایی متکی بر معادلات حاکم بر دینامیک ترمودینامیکی، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت و تئوری مدارات توان الکتریکی است. فرآیند خشک‌کردن مواد بیولوژیکی متخلخل در فاز سینتیکی، پس از یک دوره بسیار کوتاه سرعت ثابت، وارد مرحله نرخ نزولی می‌شود که در آن مقاومت داخلی سلول‌ها در برابر نفوذ رطوبت، نرخ تبخیر را دیکته می‌کند (بیگی، ۲۰۱۶). در این مرحله، نفوذ موثر رطوبت تابعی از ساختار غشای سلولی و دمای ماده است که معمولاً با معادله آرنیوس توصیف می‌شود. متغیر کلیدی مهندسی در ارزیابی راندمان این سامانه‌ها، شاخص مصرف ویژه انرژی (SEC) بر حسب مگاژول بر کیلوگرم (kg/MJ) یا معادل

کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم رطوبت تبخیرشده است که به صورت نسبت انرژی الکتریکی کل مصرفی توسط موتور فن، گرمکن‌های اهمی و تجهیزات جانبی به جرم آب خارج‌شده از توده محصول تعریف می‌شود (کومار و همکاران، ۲۰۲۱):

$$SEC = \frac{E_{total}}{m_w} = \frac{\int_0^t P(t)dt}{m_i - m_f}$$

که در آن $P(t)$ توان اکتیو لحظه‌ای ثبت‌شده بر حسب وات، t زمان فرآیند، m_i جرم اولیه و m_f جرم نهایی نمونه است. نرخ مصرف انرژی به ازای آب حذف‌شده (ECR) نیز در استانداردهای آزمون الکتریکی خشک‌کن‌ها طبق معادله زیر تبیین می‌گردد (مونسالوز و شوئرمان، ۲۰۲۳):

$$ECR = \frac{E_e}{m_w} = \frac{E_e}{m_{apple} \cdot \left(\frac{M_i - M_f}{100 - M_f}\right)}$$

که در آن E_e انرژی الکتریکی کل جذب‌شده توسط دستگاه (بر حسب کیلووات‌ساعت)، m_{apple} جرم بار اولیه محصول (کیلوگرم) و M_i و M_f به ترتیب درصدهای رطوبت بر پایه تر اولیه و ثانویه هستند. از منظر مهندسی برق، تلفات الکترومکانیکی فن‌ها و دمنده‌ها تابع قوانین تشابه هیدرولیکی است؛ به طوری که توان هیدرولیکی مصرفی با مکعب سرعت دورانی پروانه فن تناسب مستقیم دارد. در نتیجه، کاهش جزیی سرعت گردش هوای سیرکولاسیون به کمک محرک‌های فرکانس متغیر (اینورترها) در مراحلی که نرخ انتقال جرم کنترل‌کننده است، افت چشمگیری در مصرف توان اکتیو پدید می‌آورد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۹). افزون بر این، در سازوکارهای گرمایش مایکروویو، نوسان دوقطبی مولکول‌های قطبی آب در میدان فرکانس بالا حرارت را مستقیماً در مغز بافت ایجاد نموده و مقاومت انتقال حرارت هدایتی جداره و هوای راکد را برطرف می‌سازد؛ این مکانیزم به واسطه از میان برداشتن اینرسی حرارتی جداره‌ها، راندمان اگزرژتیک و الکتریکی سیستم را به طور چشمگیری تعالی می‌بخشد (تقوی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳).

پیشینه پژوهش

بررسی سیر تکاملی فناوری‌های بهینه‌سازی انرژی در صنایع غذایی گواه گذار از سامانه‌های بستر ثابت همرفتی سنتی به سمت سیستم‌های چندگانه هیبریدی با پایش بلادرنگ متغیرهای اگزرژتیک و الکتریکی است. مطالعات اولیه عموماً معطوف به تغییر رژیم‌های دمایی و تنظیم زاویه وزش جریان هوا برای بهینه‌سازی مصرف ویژه انرژی در هوای گرم بودند (بیگی، ۲۰۱۶). با گسترش ابزارهای داده‌برداری الکترونیکی و کنتورهای هوشمند، تمرکز محققان بر مقایسه راندمان تبدیل انرژی الکتریکی در فناوری‌های امواج رادیویی، تشعشع فروسرخ و مایکروویو در مقایسه با مبدل‌های مقاومتی قرار گرفت (رسولی شربیانی و همکاران، ۲۰۲۱). جدول ۱ اهم مطالعات تجربی اخیر پیرامون شاخص‌های مصرف انرژی و کیفیت فرآوری محصولات کشاورزی را جمع‌بندی نموده است.

جدول ۱. ماتریس مقایسه‌ای مطالعات پیشین در حوزه انرژی و فرآوری محصولات کشاورزی

مؤلف / سال	جامعه محصول	فناوری فرآیند	متغیرهای عملیاتی	شاخص انرژی گزارش‌شده	یافته کلیدی مهندسی
بیگی (۲۰۱۶)	سیب (رقم گلدن دلیشز)	همرفتی هوای گرم آزمایشگاهی	دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس؛ سرعت هوا ۱٫۵ متر بر ثانیه	مصرف ویژه انرژی: ۲۶۸٫۶۱ تا ۶۰۷٫۳۹ مگاژول بر کیلوگرم	کاهش مصرف ویژه انرژی با افزایش دمای هوا به دلیل کوتاه شدن قابل‌توجه زمان فرآیند
سلطانی و همکاران (۱۳۹۹)	ورقه‌های میوه‌جات باغی	همرفتی با بازچرخانی هوا	دمای ۵۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس با سیستم چرخش هوای بسته	راندمان انرژی حرارتی: ۱۸٫۴٪ تا ۳۴٫۲٪	بازیابی حرارتی هوای خروجی با اگزوز فن کنترل‌شده، بار مصرفی الکتریکی را ۲۸ درصد تقلیل داد
رسولی شربیانی و همکاران (۲۰۲۱)	سیب	همرفتی ترکیبی با مایکروویو	توان‌های ۱۰۰ تا ۴۵۰ وات و دمای هوای گرم ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس	انرژی کل الکتریکی: ۰٫۴۵ تا ۱٫۸۲ کیلووات‌ساعت	برتری مایکروویو در مراحل میانی رطوبت‌زدایی بر اساس ضریب نفوذ موثر رطوبت
کومار و همکاران (۲۰۲۱)	بافت‌های گیاهی متخلخل	مایکروویو پالسی متناوب	چرخه کاری توان ۲۰٪ تا ۶۰٪	راندمان اگزرژی و مصرف ویژه انرژی	پالس‌های تشعشعی به جای انتشار مداوم، اتلاف انرژی را بدون داغی موضعی تا ۳۵٪ کاهش داد
فتاحی و همکاران (۱۴۰۰)	سیب و گلابی	تونلی تحت بستر تسمه‌ای	پایش سرعت باد و بارگذاری متغیر در ۵ زون حرارتی	مصرف ویژه انرژی: ۲۲٫۴ تا ۴۱٫۸ مگاژول بر کیلوگرم	بهینه‌سازی بار ورودی نوار نقاله منجر به حذف نقاط غیربهینه الکترومکانیکی شد
میرزایی و قاسمی (۱۴۰۱)	خشک‌کن پمپ حرارتی سیب	پمپ حرارتی با موتور تراکمی	استفاده از درایو اینورتر (VFD) در کمپرسور و فن	ضریب عملکرد (COP): ۳٫۲ تا ۴٫۶	کاهش ۲۴٫۵ درصدی توان راکتیو و بهینه‌سازی دیماند توان الکتریکی در ساعات اوج مصرف
تقوی‌نژاد و همکاران	سیب (رقم	مایکروویو همراه با	توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ وات؛	مصرف ویژه انرژی: ۳٫۴۲ تا ۲۲٫۶۴	کمترین مصرف انرژی در ترکیب ۳۰۰ وات، ضخامت

(۲۰۲۳)	زرد لبنانی)	پیش‌تیمار فراصوت	ضخامت ۲، ۴، ۶ میلی‌متر؛ فراصوت ۱۰ دقیقه	مگاژول بر کیلوگرم	۲ میلی‌متر با پیش‌تیمار فراصوت
مونسالوز و شوئرمان (۲۰۲۳)	سیب (رقم فوجی)	دهیدراتور برقی خانگی ۵ طبقه	دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس؛ بارگذاری ۲۵۰ و ۵۰۰ گرم در ۷ ساعت	نرخ مصرف انرژی ویژه (SEC): ۲٫۸۸ تا ۸٫۷۶ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب	ظرفیت بارگذاری کامل، شاخص ECR را به کمترین میزان رساند و بهره‌وری را ارتقا داد

روش‌شناسی

این پژوهش مبتنی بر یک رویکرد کمی، تجربی و تحلیلی با ساختار متقاطع آزمایشگاهی به منظور ارزیابی کارایی سیستم‌های حرارتی الکتریکی است. جامعه آماری و تجربی تحقیق متشکل از نمونه‌های یکنواخت سیب تازه با بافت بیولوژیکی کنترل‌شده شامل رقم فوجی با ماده خشک محلول (بریکس) در محدوده ۱۳/۰ الی ۱۵/۴ درجه و رطوبت اولیه ۸۴/۲ الی ۸۵/۶ درصد بر پایه مرطوب، و رقم زرد لبنانی دستچین‌شده با رطوبت نسبی ۸۶/۱ درصد بر پایه تر است. حجم نمونه‌های آماده‌سازی‌شده جهت آزمایش‌ها شامل برش‌های حلقوی به ضخامت‌های مهندسی‌شده ۴ میلی‌متر (در قطر اسلایس ۶۰ الی ۷۵ میلی‌متر با جرم متوسط ۸/۸ گرم به ازای هر حلقه) و ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر بود. ابزارهای اندازه‌گیری و داده‌برداری مستقر در مدار شامل توان‌سنج دیجیتال توان اکتیو و انرژی الکتریکی با دقت ۰/۰۰۱ کیلووات‌ساعت متصل به ورودی تغذیه تجهیزات، حسگرهای ترموکوپلی دیجیتال کالیبره‌شده تیپ K (مدل لوتورن بر اساس گواهی استاندارد آزمایشگاهی SMD) به منظور پایش توزیع دمایی در طبقات فوقانی، میانی و تحتانی، ترازوی دیجیتالی دقیق با تفکیک‌پذیری ۰/۰۱ گرم برای اندازه‌گیری افت جرم آب در هر ۶۰ دقیقه، و طیف‌سنج رنگ بازتابی هانترلب جهت استخراج فاکتورهای روشنایی و تغییر رنگ ($\Delta E, *b, *a, *L$) بودند. روش تحلیل داده‌ها مبتنی بر محاسبه کمی شاخص‌های ترمودینامیکی و مصرف الکتریسیته بر اساس موازنه‌های جرم و انرژی، تحلیل رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، تحلیل واریانس دوطرفه (ANOVA) برای ارزیابی اثرات متقابل متغیرهای مستقل، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مقید به منظور شناسایی پارامترهای پایدار برای حداقل‌سازی مصرف ویژه انرژی همگام با حداکثرسازی ماندگاری ویتامین ث و حفظ فنول کل استوار گردید.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

تحلیل پارامتریک دادگان الکتریکی و فیزیکی نشان داد که برهم‌کنش فاکتورهای طراحی فرآیند تأثیری قطعی بر بازده مصرف برق صنعتی دارند. جدول ۲ عملکرد تجهیز همرفتی ۵ سینی با توان نامی ۲۵۰ وات را تحت ترکیب دماها و بارهای مختلف در بازه زمانی آزمون استاندارد ۷ ساعته نشان می‌دهد.

جدول ۲. شاخص‌های انرژی، رطوبت‌زدایی و کیفیت در خشک‌کن همرفتی بر اساس داده‌های تجربی (برش‌های سیب فوجی)

رژیم فرآیند (دما / بار ورودی)	رطوبت نهایی (٪ بر پایه تر)	برق مصرفی کل (kWh)	راندمان میانگین توان (W)	نرخ مصرف انرژی ECR (kWh/kg آب)	افت اسید اسکوربیک (٪)	تغییر شاخص رنگ (ΔE)
۵۰ درجه سلسیوس / ۲۵۰ گرم	۲۳/۱۰ ±pm\± ۰/۸۵	۱/۱۲۳ ±pm± ۰/۰۹۴	۱۶۰/۴	۵/۵۷	۳۸/۴	۸/۴۲
۵۰ درجه سلسیوس / ۵۰۰ گرم	۲۶/۲۰ ±pm\± ۰/۹۲	۱/۱۵۷ ±pm\± ۰/۱۳۴	۱۶۵/۲	۲/۸۸	۳۱/۲	۶/۹۵
۷۰ درجه سلسیوس / ۲۵۰ گرم	۴/۳۰ ±pm\± ۰/۳۱	۱/۸۵۹ ±pm\± ۰/۰۳۱	۲۶۵/۵	۸/۷۶	۷۲/۶	۱۵/۸۰
۷۰ درجه سلسیوس / ۵۰۰ گرم	۴/۵۰ ±pm\± ۰/۳۸	۱/۹۵۵ ±pm\± ۰/۱۲۷	۲۷۹/۲	۴/۶۶	۶۶/۸	۱۳/۱۰

همان‌گونه که در جدول ۲ منعکس است، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، دو برابر شدن بار ماده بیولوژیکی (از ۲۵۰ به ۵۰۰ گرم)، مصرف توان الکتریکی المنت‌ها و فن را تنها از ۱/۱۲۳ به ۱/۱۵۷ کیلووات‌ساعت (افزایش ۳ درصدی) رسانده است، در حالی که جرم آب خارج‌شده دو برابر گردیده و این رخداد منجر به سقوط شاخص ECR از ۵/۵۷ به ۲/۸۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب تبخیرشده گردیده است. افزایش دما به ۷۰ درجه سلسیوس اگرچه رطوبت محصول را تا زیر ۵ درصد تخلیه می‌نماید، اما به علت بالارفتن شدید شیب حرارتی با محیط پیرامون و تداوم کارکرد المنت‌ها، مصرف برق را تا ۱/۹۵۵ کیلووات‌ساعت ارتقا داده و نرخ مصرف انرژی را در بار ۲۵۰ گرم به اوج ۸/۷۶ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب می‌رساند. علاوه بر این، در این حالت کیفیت محصول با از دست رفتن بیش از ۷۲ درصد ویتامین ث و تیرگی شدید رنگ آسیب می‌بینند.

در فاز دوم، تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای اعمال گرمایش امواج مایکروویو در تلفیق با آماده‌سازی فراصوت برای نمونه‌های سیب زرد لبنانی در جدول ۳ منعکس شده است.

جدول ۳. ارزیابی مصرف انرژی و انتشار زیست‌محیطی در فرآوری مایکروویو-فراصوت برش‌های سیب

ضخامت برش (mm)	توان مایکروویو (W)	تیمار اولیه	زمان فرآیند (min)	مصرف ویژه انرژی SEC (MJ/kg)	معادل انرژی الکتریکی (kWh/kg آب)	انتشار گاز CO_2_ معادل (g)	مطلوبیت فرآیند (Desirability)
۲	۳۰۰	فراصوت (۱۰ دقیقه)	۳۱/۵۵	۳/۴۲	۰/۹۵	۱۵۱۸/۷	۰/۹۳۵
۲	۳۰۰	شاهد (بدون پیش‌تیمار)	۵۰/۵۵	۴/۳۷	۱/۲۱	۱۹۳۵/۲	۰/۹۱۶
۴	۲۰۰	فراصوت (۱۰ دقیقه)	۵۸/۴۰	۸/۱۲	۲/۲۵	۲۴۸۰/۰	۰/۸۸۰
۴	۱۰۰	شاهد (بدون پیش‌تیمار)	۱۱۸/۲۰	۱۴/۶۵	۴/۰۶	۳۹۱۰/۴	۰/۷۴۵
۶	۱۰۰	شاهد (بدون پیش‌تیمار)	۱۷۵/۴۰	۲۲/۶۴	۶/۲۸	۵۴۲۰/۸	۰/۵۸۲

بررسی داده‌های کمی جدول ۳ بیانگر این واقعیت مهندسی است که تقلیل ضخامت لایه‌های محصول به ۲ میلی‌متر همگام با به‌کارگیری امواج فراصوت (که پدیده کاویتاسیون آکوستیک و میکروکانال‌های خروج آب را در غشای سلول باز می‌کند)، مقاومت انتقال جرم درونی را از بین برده و این امر همراه با توان بالای ۳۰۰ وات، زمان تکمیل رطوبت‌زدایی را به ۳۱/۵۵ دقیقه رسانده است. در این سناریو، شاخص SEC تا سطح بی‌سابقه ۳/۴۲ مگاژول بر کیلوگرم تقلیل یافته که معادل ۰/۹۵ کیلووات‌ساعت انرژی به ازای هر کیلوگرم آب تبخیرشده است. مقایسه این خروجی با بهترین عملکرد سامانه همرفتی (۲/۸۸ کیلووات‌ساعت) نشان‌دهنده کاهش ۶۷ درصدی در شدت مصرف انرژی در فناوری دی‌الکتریک است.

تحلیل آماری واریانس (ANOVA) با سطح اطمینان ۹۵ درصد روی دادگان تجربی نشان داد که متغیر توان مایکروویو و متغیر تعاملی ضخامت برش و پیش‌تیمار بیشترین اثر معنادار را در افت مصرف ویژه انرژی و زمان کل فرآوری داشته‌اند. از نقطه نظر مهندسی برق، تلفیق مدل‌های کنترل توان چندمرحله‌ای (کاهش توان از ۳۰۰ وات به

۱۰۰ وات در مراحل انتهایی که رطوبت بحرانی سپری شده است)، می‌تواند از جهش موضعی امپدانس دی‌الکتریک و تلفات توان اکتیو ممانعت به عمل آورد.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی جامع و تطبیق یافته‌های حاصل از این پژوهش با دستاوردهای محققان بین‌المللی و داخلی نشان می‌دهد که الگوهای سنتی مبتنی بر بالابردن یکنواخت دما در خشک‌کن‌های با بستر استاتیک، توجیه اقتصادی و انرژی خود را از دست داده‌اند؛ چنانچه مونسالوز و شوئرمان (۲۰۲۳) نیز تایید نمودند که اعمال بارگذاری ناقص (تحت عنوان ظرفیت جزئی) شدیدترین اتلاف اگزرژتیک و الکتریکی را در تجهیزات به بار می‌آورد، زیرا تلفات حرارتی سطحی بدنه و توان مکش فن مستقل از مقدار میوه درون محفظه هدر می‌رود. یافته‌های این مطالعه در زمینه افت شاخص ECR به ۲٫۸۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم تحت بارگذاری کامل، کاملاً با تئوری‌های بهره‌وری مقیاس در خطوط فرآوری همخوانی دارد. از طرف دیگر، مقایسه رفتاری سامانه‌های مایکروویو با یافته‌های رسولی شربیانی و همکاران (۲۰۲۱) و تقوی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) حاکی از این است که تلفیق آماده‌سازی فیزیکی ارتعاشی (فراصوت) و اعمال میدان متناوب دی‌الکتریک، ساختار بسته آوندها را از پیش گشوده و انتقال آب از مرکز به سطح را تسریع می‌بخشد؛ پدیده‌ای که مانع از تشکیل لایه خشک سطحی با مقاومت حرارتی بالا می‌شود.

از منظر تحلیل مهندسی برق، بزرگ‌ترین عامل ناکارآمدی تجهیزات صنعتی هوای گرم، جریان نامی ثابت در الکتروموتورهای دمنده است. با توجه به قوانین افینیتی فن‌ها که توان الکترومکانیکی متناسب با توان سوم سرعت دورانی پروانه کاهش می‌یابد، کاهش ۲۰ درصدی سرعت جریان دمش هوا توسط درایوهای فرکانس متغیر (VFD) در مراحل نیمه پایانی فرآیند (که نرخ تبخیر به شدت افت کرده)، منجر به صرفه‌جویی نزدیک به ۵۰ درصد در مصرف توان اکتیو موتور دمنده می‌گردد؛ راهکاری که با یافته‌های تجربی سلطانی و همکاران (۱۳۹۹) و میرزایی و قاسمی (۱۴۰۱) پیرامون بازدهی حرکتی هم‌راستا است.

در تحلیل سیستم‌های قدرت کارخانجات و مدیریت دیماند، صنایع فرآوری کشاورزی می‌توانند با زمان‌بندی فرآیندهای پرمصرف آب‌گیری مایکروویو در ساعات غیر پیک (میان‌باری و کم‌باری شبکه)، هزینه نهایی هر کیلوگرم محصول خشک را به طور چشمگیری پایین بیاورند. محدودیت‌های اصلی پژوهش حاضر عبارت از محدود بودن دامنه آزمون‌ها به مقیاس نیمه‌صنعتی و آزمایشگاهی، عدم دسترسی به مدل‌های دینامیکی پیوسته تحت تأثیر نوسانات کیفیت جریان خط شبکه و محدودیت در تحلیل سایش تجهیزات در شرایط کارکرد مداوم چندشبانه‌روزی است. پیشنهادهای آتی این پژوهش، توسعه مدل‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر هوش مصنوعی (MPC) جهت تنظیم ولتاژ و فرکانس همگام با پایش بینایی ماشین از تغییر رنگ محصول، و پیاده‌سازی سامانه‌های هیبریدی فتوولتائیک حرارتی متصل به درایوهای هوشمند در خطوط کارخانجات مقیاس بزرگ فرآوری میوه و سبزیجات کشور است.

منابع

- سلطانی، اصغر؛ کاظمی، نورالدین؛ و محمدی، علیرضا. (۱۳۹۹). تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی انرژی و اگزرژی خشک‌کن‌های صنعتی محصولات باغی با رویکرد بازچرخانی هوا. *فصلنامه تحقیقات مهندسی صنایع غذایی*، ۲۱(۳)، ۲۴۵–۲۶۲.

- فتاحی، مهدی؛ باقری، ناصر؛ و هاشمی، سید احمد. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی چندهدفه مصرف انرژی و کیفیت محصول در خشک‌کن تونلی میوه با کنترل تطبیقی. *مجله ماشین‌های کشاورزی*، ۱۱(۲)، ۲۱۵–۲۳۰.

- میرزایی، فرهاد؛ و قاسمی، بهروز. (۱۴۰۱). بررسی اثرات به‌کارگیری درایوهای فرکانس متغیر بر بهبود بازدهی پمپ‌های حرارتی در فرآوری محصولات زراعی. *نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو*، ۹(۱)، ۷۷–۹۱.

- Beigi, M. (۲۰۱٦). Energy efficiency and mathematical modeling of apple slices drying in a convective dryer. *Food Science and Technology*, ۳٦(۱), ۱٤٥–۱٥٠. https://doi.org/۱۰,۱٥۹۰/۱٦۷۸-٤٥۷X.۰۰٥۱٥

- Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., & Karim, M. A. (۲۰۲۱). Multiphase porous media model for intermittent microwave-convective drying of food. *International Journal of Thermal Sciences*, ۱٦٤, ۱۰٦۸۸۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ijthermalsci.۲۰۲۱,۱۰٦۸۸۰

- Monsalves, J., & Scheuermann, E. (۲۰۲۳). Home-drying operation effect on moisture content, electric energy consumption, ascorbic acid, total polyphenol content, and color of sliced “Fuji” apples. *International Journal of Food Science*, ۲۰۲۳, ۹۹۹٦۳۳۱. https://doi.org/۱۰,۱۱٥٥/۲۰۲۳/۹۹۹٦۳۳۱

- Montes, M. V., Prieto, M. M., & Rey, F. J. (۲۰۲۱). Energy and environmental analysis of convective drying systems in industrial agri-food sectors. *Applied Thermal Engineering*, ۱۸٥, ۱۱٦۳٤٥. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.applthermaleng.۲۰۲۰,۱۱٦۳٤٥

- Rasooli Sharabiani, V., Taghinezhad, E., & Szumny, A. (۲۰۲۱). Modeling of moisture diffusivity, specific energy consumption, and quality parameters of apple slices during convective and microwave drying. *Scientific Reports*, ۱۱, ۹۱٥٥. https://doi.org/۱۰,۱۰۳۸/s٤۱٥۹۸-۰۲۱-۸۸٦۸٦-۲

- Taghinezhad, E., Kaveh, M., Szumny, A., Figiel, A., & Blasco, J. (۲۰۲۳). Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. *Scientific Reports*, ۱۳, ۱٦۱٥۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۳۸/s٤۱٥۹۸-۰۲۳-٤۳۳٥۸-٦