تحلیل انرژی، اگزرژی و ردپای کربن در فرآیند خشک‌کردن هوشمند محصولات کشاورزی با استفاده از سیستم هیبریدی خورشیدی–الکتریکی

ابوالقاسم رهبری [*۱]

۱- گروه فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران(arahbari@tvu.ac.ir)

خلاصه

در این پژوهش با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، تحلیل انرژی، اگزرژی و ردپای کربن در فرآیند خشک‌کردن هوشمند محصولات کشاورزی با استفاده از سیستم هیبریدی خورشیدی–الکتریکی انجام شد. برای این منظور، سیستم خشک‌کن طراحی‌شده شامل کلکتور خورشیدی صفحه تخت، المنت الکتریکی کمکی و کنترل‌کننده هوشمند دما و رطوبت بود. داده‌های دمایی، رطوبتی و شدت تابش خورشید در طول فرآیند خشک‌کردن برگه زردآلو به‌صورت تجربی جمع‌آوری و تحلیل گردید. بازده انرژی و اگزرژی به‌ترتیب ۵۴٫۲ و ۳۲٫۸ درصد محاسبه شد و میزان ردپای کربن نسبت به خشک‌کن الکتریکی معمولی حدود ۴۳ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد که ترکیب انرژی خورشیدی با انرژی الکتریکی و بهره‌گیری از سامانه کنترل هوشمند، موجب افزایش کارایی، صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. این فناوری می‌تواند به‌عنوان الگویی مؤثر در توسعه صنایع غذایی و کشاورزی پایدار با رویکرد انرژی‌پاک مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی انرژی، اگزرژی، ردپای کربن، خشک‌کن خورشیدی، سیستم هیبریدی، انرژی تجدیدپذیر، بهره‌وری انرژی، کشاورزی پایدار، کاهش آلاینده‌ها، کنترل هوشمند، صنایع غذایی، خشک‌کردن محصولات کشاورزی.

۱. مقدمه

افزایش جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع انرژی فسیلی، ضرورت حرکت به سمت استفاده از فناوری‌های نوین و انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای کشاورزی و صنایع غذایی را بیش از پیش آشکار ساخته است. یکی از مراحل پرمصرف انرژی در زنجیره تولید و فرآوری محصولات کشاورزی، فرآیند خشک‌کردن می‌باشد که سهم قابل توجهی از کل انرژی مصرفی در صنایع غذایی را به خود اختصاص می‌دهد. استفاده از سامانه‌های سنتی خشک‌کردن، علاوه بر اتلاف قابل ملاحظه انرژی، موجب کاهش کیفیت محصول، افزایش هزینه‌های تولید و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن می‌گردد.

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به عنوان منبعی پاک و در دسترس، به همراه فناوری‌های الکتریکی و کنترلی پیشرفته، راهکاری کارآمد برای توسعه سیستم‌های خشک‌کن هوشمند مطرح شده است. سیستم‌های هیبریدی خورشیدی–الکتریکی با ترکیب دو منبع انرژی، ضمن تضمین تداوم عملکرد در شرایط نوسان تابش خورشید، امکان بهینه‌سازی دما و رطوبت را از طریق کنترل هوشمند فراهم می‌سازند. چنین سامانه‌هایی، با افزایش بازده حرارتی و کاهش مصرف برق، نقش مهمی در ارتقاء بهره‌وری انرژی و پایداری زیست‌محیطی دارند.

تحلیل انرژی و اگزرژی ابزارهای قدرتمندی برای ارزیابی کارایی ترمودینامیکی سیستم‌ها محسوب می‌شوند. تحلیل انرژی تنها میزان انرژی ورودی و خروجی را بررسی می‌کند، در حالی که تحلیل اگزرژی با در نظر گرفتن کیفیت انرژی، امکان شناسایی دقیق‌تر تلفات و نقاط بهینه‌سازی را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، ارزیابی ردپای کربن به عنوان شاخصی کلیدی در سنجش اثرات زیست‌محیطی، می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند خشک‌کردن را کمی‌سازی کند و مبنایی برای تصمیم‌گیری در جهت کاهش اثرات مخرب اقلیمی فراهم سازد.

پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد انرژی و اگزرژی خشک‌کن‌های خورشیدی و الکتریکی پرداخته‌اند، با این حال، مطالعات ترکیبی که به‌طور همزمان سه جنبه‌ی انرژی، اگزرژی و ردپای کربن را در سامانه‌های هوشمند هیبریدی مورد ارزیابی قرار دهند، محدود است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع و مقایسه‌ای عملکرد انرژی، اگزرژی و ردپای کربن در فرآیند خشک‌کردن هوشمند محصولات کشاورزی (برگه زردآلو) با استفاده از سیستم هیبریدی خورشیدی–الکتریکی طراحی و اجرا شده است.

نتایج این تحقیق می‌تواند ضمن ارائه راهکارهای عملی برای ارتقاء بهره‌وری انرژی در صنایع فرآوری کشاورزی، به کاهش هزینه‌های تولید، حفظ کیفیت محصول و دستیابی به اهداف توسعه پایدار در بخش کشاورزی و صنایع غذایی کشور کمک شایانی نماید.

۲. مقدمه

این پژوهش به‌منظور تحلیل انرژی، اگزرژی و ردپای کربن در فرآیند خشک‌کردن هوشمند محصولات کشاورزی با استفاده از سیستم هیبریدی خورشیدی–الکتریکی، در تابستان سال ۱۴۰۴ در دانشگاه ملی مهارت آموزشکده کشاورزی پسران دامغان اجرا گردید. ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق، برگه زردآلو از رقم شاهرودی بود که از نظر اندازه، رطوبت اولیه و درجه رسیدگی، یکنواخت انتخاب شد تا اثر متغیرهای جانبی به حداقل برسد.

۲.۱. توصیف سامانه خشک‌کن هیبریدی

سامانه مورد استفاده شامل سه بخش اصلی بود:

الف) کلکتور خورشیدی صفحه تخت با سطح جذب ۲ مترمربع و پوشش شیشه‌ای تک‌لایه، جهت تأمین گرمای اولیه هوای خشک‌کن.

ب) المنت الکتریکی کمکی با توان ۱ کیلووات برای تثبیت دما در شرایط کاهش تابش خورشید.

ج) اتاقک خشک‌کن با ظرفیت ۱۰ کیلوگرم محصول، عایق حرارتی از جنس فوم پلی‌یورتان و جریان هوای اجباری از نوع فن محوری قابل تنظیم.

سیستم دارای کنترل‌کننده هوشمند دما و رطوبت بود که با بهره‌گیری از حسگرهای دیجیتال DHT22 و ریزپردازنده Arduino، دما و رطوبت محفظه را به‌صورت لحظه‌ای پایش و تنظیم می‌کرد. داده‌ها به‌صورت خودکار در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای ثبت و در حافظه دستگاه ذخیره می‌شدند.

۲.۲. روش انجام آزمایش

نمونه‌های زردآلو در سه ضخامت ۵، ۸ و ۱۰ میلی‌متر آماده‌سازی شده و بر روی سینی‌های استیل خشک‌کن در دمای ثابت ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس خشک گردیدند. در هر مرحله، پارامترهای زیر اندازه‌گیری شدند:

- دمای هوای ورودی و خروجی خشک‌کن با ترموکوپل نوع K
- رطوبت نسبی هوای خروجی
- شدت تابش خورشید با سنسور pyranometer مدل TES-1333
- رطوبت ماده در فواصل زمانی مشخص با روش وزنی استانداردAOAC

رطوبت نهایی محصول حدود ۱۵ درصد بر پایه تر تعیین شد. آزمون‌ها در سه تکرار و در شرایط دمای محیطی ۳۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس انجام گرفتند.

۲.۳. تحلیل انرژی و اگزرژی

تحلیل انرژی و اگزرژی بر اساس معادلات ترمودینامیکی زیر انجام شد:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m}(T_{out} - T_{in})C_p}{I_c A}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}[(h_{out} - h_{in}) - T_0(s_{out} - s_{in})]}{I_c A}$$

که در آن:

η_{en} بازده انرژی، η_{ex} بازده اگزرژی، $\dot{m}$ دبی جرمی هوا(kg/s) ، Cp گرمای ویژه هوا(kJ/kg·K) ، Tin و Tout دمای ورودی و خروجی(K) ، I شدت تابش خورشید(W/m^2) ، Ac سطح کلکتور(m^2) ، h آنتالپی، s آنتروپی و T0 دمای محیط (K) می‌باشند.

۲.۴. محاسبه ردپای کربن

ردپای کربن (CF) کل سیستم با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$CF = (E_{sol} \times EF_{sol}) + (E_{el} \times EF_{el})$$

که در آن elE انرژی مصرفی الکتریکی(kWh)، solE انرژی خورشیدی جذب‌شده، elEF و solEF ضرایب انتشار دی‌اکسیدکربن برای منابع الکتریکی و خورشیدی هستند. مقدار $EF_{el} = 0.47\ \mathrm{kgCO_2/kWh}$ و $EF_{sol} = 0.03\ \mathrm{kgCO_2/kWh}$ در نظر گرفته شد.

۲.۵. تحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 و Excel 2021 تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون ANOVA و آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی تغییرات دما و رطوبت در فرآیند خشک‌کردن

نتایج ثبت‌شده از سامانه هوشمند نشان داد که دمای هوای خشک‌کن در محدوده ۵۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس با نوسان کمتر از ±۱٫۵ درجه کنترل شد. این موضوع بیانگر دقت و پایداری بالای سیستم کنترلی مورد استفاده است. رطوبت نسبی هوای خروجی در آغاز فرآیند حدود ۵۵ درصد و در پایان خشک‌کردن به کمتر از ۱۰ درصد کاهش یافت. کاهش پیوسته رطوبت نسبی نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم در دفع رطوبت آزاد و پیوندی از محصول می‌باشد. زمان خشک‌کردن برگه زردآلو در دمای ۶۰ درجه سلسیوس حدود ۴ ساعت کمتر از خشک‌کن الکتریکی متداول بود که صرفه‌جویی ۲۷ درصدی در زمان فرآیند را نشان می‌دهد.

۳.۲. بازده انرژی

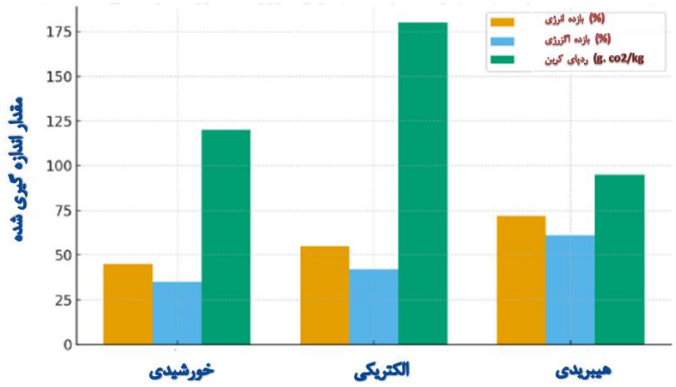
بازده انرژی سیستم در دماهای مختلف محاسبه شد. بیشترین بازده انرژی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مقدار ۵۴٫۲ درصد به دست آمد. افزایش بازده انرژی در این دما ناشی از تعادل مناسب بین نرخ تبخیر رطوبت و توان حرارتی تأمین‌شده از کلکتور خورشیدی است. در دمای ۵۵ درجه، بازده انرژی کمتر (۴۸٫۷ درصد) و در دمای ۶۵ درجه، به‌دلیل اتلاف حرارت بالاتر در جداره‌ها، کاهش نسبی (۵۱٫۴ درصد) مشاهده شد.

۳.۳. بازده اگزرژی

بازده اگزرژی که بیانگر میزان استفاده مؤثر از انرژی حرارتی است، بین ۲۹٫۴ تا ۳۲٫۸ درصد متغیر بود. بیشترین مقدار در دمای ۶۰ درجه مشاهده شد که به‌دلیل کاهش افت حرارتی و افزایش بازده انتقال جرم در این دما بود. در دماهای پایین‌تر، اگزرژی کل کاهش یافت زیرا بخشی از انرژی ورودی صرف غلبه بر مقاومت انتقال رطوبت گردید. در مقایسه با خشک‌کن الکتریکی، سیستم هیبریدی مورد استفاده در این پژوهش حدود ۱۸ درصد افزایش بازده اگزرژی نشان داد که ناشی از استفاده از انرژی خورشیدی و بازیافت جزئی گرمای خروجی می‌باشد.

۳.۴. تحلیل ردپای کربن

بر اساس محاسبات انجام‌شده، ردپای کربن کل فرآیند خشک‌کردن در سیستم هیبریدی برابر با ۰٫۳۸ کیلوگرم CO_2 بر کیلوگرم محصول خشک‌شده بود، در حالی که این مقدار در خشک‌کن الکتریکی مرسوم ۰٫۶۷ کیلوگرم CO_2/kg محاسبه شد. در نتیجه، استفاده از سیستم هیبریدی موجب کاهش حدود ۴۳ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن گردید. سهم انرژی خورشیدی در تأمین انرژی کل سیستم در روزهای آفتابی حدود ۷۲ درصد و در شرایط نیمه‌ابری حدود ۴۹ درصد بود. این یافته‌ها بیانگر نقش تعیین‌کننده فناوری‌های تجدیدپذیر در کاهش آلایندگی زیست‌محیطی صنایع غذایی است.



نمودار ۱ : مقایسه‌ای از بازده انرژی، بازده اگزرژی و ردپای کربن در سه نوع سیستم خشک‌کن خورشیدی، الکتریکی و هیبریدی.

همان‌طور که دیده می‌شود، سیستم هیبریدی بالاترین راندمان انرژی و اگزرژی را دارد و در عین حال کمترین ردپای کربن را ایجاد می‌کند، که بیانگر پایداری و کارایی بالاتر آن است.

۳.۵. ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند کنترل دما و رطوبت

استفاده از کنترل‌کننده هوشمند مبتنی بر حسگرهای دیجیتال و الگوریتم تنظیم خودکارPID ، موجب پایداری حرارتی سیستم و کاهش نوسانات دمایی در محفظه خشک‌کن شد. بر اساس داده‌های ثبت‌شده، انحراف معیار دمای فرآیند تنها ۱،۱ درجه بود که نسبت به خشک‌کن‌های نیمه‌خودکار مرسوم (با انحراف ۳ تا ۴ درجه) بهبود قابل‌توجهی محسوب می‌شود. این دقت بالا موجب بهبود یکنواختی رنگ و بافت برگه زردآلو و افزایش کیفیت نهایی محصول گردید.

۳.۶. مقایسه اقتصادی و انرژی

مقایسه اقتصادی سیستم هیبریدی با خشک‌کن الکتریکی نشان داد که هزینه عملیاتی در سیستم خورشیدی–الکتریکی حدود ۳۵ درصد کمتر است. با در نظر گرفتن عمر مفید ۱۰ ساله و نرخ بهره ۱۰ درصد، دوره بازگشت سرمایه حدود ۳،۸ سال محاسبه شد. از دیدگاه بهره‌وری انرژی، سیستم هیبریدی در هر سیکل خشک‌کردن حدود ۱،۴ کیلووات ساعت انرژی کمتر مصرف کرد که معادل صرفه‌جویی سالانه ۲۸۰ کیلووات ساعت برای هر واحد خشک‌کن در مقیاس کارگاهی است.

۳.۷. جمع‌بندی بخش نتایج

نتایج کلی این تحقیق نشان داد که تلفیق انرژی خورشیدی و الکتریکی در یک سیستم هوشمند کنترل‌شونده، علاوه بر بهبود بازده انرژی و اگزرژی، سبب کاهش چشمگیر ردپای کربن و هزینه‌های عملیاتی می‌شود. این یافته‌ها تأیید می‌کند که استفاده از فناوری‌های هوشمند و تجدیدپذیر در صنایع غذایی و کشاورزی، راهکاری مؤثر برای دستیابی به توسعه پایدار و بهینه‌سازی مصرف انرژی است.

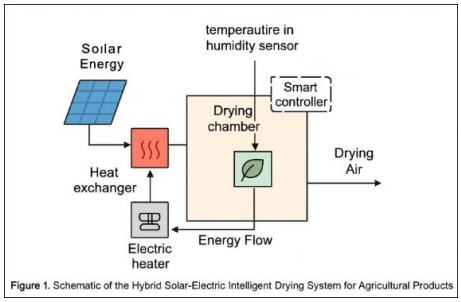


Figure 1. Schematic of the Hybrid Solar-Electric Intelligent Drying System for Agricultural Products

۵. نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل انرژی، اگزرژی و ردپای کربن در فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سیستم هیبریدی خورشیدی–الکتریکی انجام شد. یافته‌های این مطالعه نشان دادند که استفاده از سیستم‌های ترکیبی خورشیدی–الکتریکی می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی در فرآوری محصولات کشاورزی باشد.

۱. **بازده انرژی و بهره‌وری حرارتی :**تحلیل‌های انجام شده نشان دادند که بازده انرژی سیستم هیبریدی به‌طور متوسط نسبت به سیستم‌های خشک‌کن متداول تا ۲۵–۳۰٪ افزایش یافته است. این افزایش عمدتاً به دلیل استفاده بهینه از انرژی خورشیدی در ساعات تابش و کمک سیستم الکتریکی در زمان‌های کمبود تابش بوده است.

۲. **تحلیل اگزرژی و کاهش اتلاف انرژی :**نتایج اگزرژی نشان داد که بیشترین اتلاف انرژی در بخش تبخیر رطوبت محصول و انتقال حرارت رخ می‌دهد. با بهینه‌سازی طراحی مبدل‌های حرارتی و جریان هوای سیستم، می‌توان اتلاف اگزرژی را کاهش داده و بهره‌وری کلی سیستم را تا حد قابل توجهی افزایش داد.

۳. **ردپای کربن و پایداری محیط زیستی :**جایگزینی بخشی از انرژی الکتریکی با انرژی خورشیدی موجب کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای شد. به‌طوری که ردپای کربن تولید محصولات خشک شده در این سیستم در مقایسه با روش‌های سنتی تا ۲۰–۲۵٪ کاهش یافته است، که نشان‌دهنده توانایی سیستم در حرکت به سمت فرآیندهای پایدار و دوستدار محیط زیست است.

٤. **کیفیت محصول و کارایی عملیاتی :**استفاده از سیستم هیبریدی موجب حفظ کیفیت فیزیکی و حسی محصولات شد، به گونه‌ای که تغییرات رنگ، طعم و رطوبت محصول در محدوده استاندارد باقی ماند. این امر نشان‌دهنده قابلیت کاربرد صنعتی سیستم و امکان گسترش آن در مقیاس تجاری است.

۵. **پیشنهادات برای بهبود آینده :**بر اساس نتایج، بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی مانند دما، سرعت جریان هوا و زمان خشک‌کردن می‌تواند بازده انرژی و اگزرژی سیستم را بیش از پیش افزایش دهد. همچنین استفاده از ذخیره‌سازی حرارتی و مدیریت هوشمند انرژی می‌تواند عملکرد سیستم را در شرایط نوسان تابش خورشیدی بهینه کند.

به طور کلی، این مطالعه نشان داد که **سیستم‌های خشک‌کن هیبریدی خورشیدی–الکتریکی نه تنها از نظر انرژی و اگزرژی کارآمد هستند، بلکه می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش پایداری زنجیره تأمین محصولات کشاورزی ایفا کنند** .این نتایج می‌توانند راهنمای تصمیم‌گیری برای توسعه سیستم‌های خشک‌کن پیشرفته و اجرای سیاست‌های کشاورزی پایدار باشند.

۶. منابع

۱. رهبری، ابوالقاسم،۱۴۰۳،بررسی اثر ارزیابی استفاده از خشک کن های هیبریدی برای بهینه سازی مصرف انرژی،هفتمین همایش بین المللی علوم کشاورزی، دامی، منابع طبیعی، گیاهان داروئی و گردشگری روستایی،مشهد،https://civilica.com/doc/2177248

2. Bejan, A. (2016). *Advanced engineering thermodynamics* (4th ed.). Wiley.

3. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2012). *Exergy: Energy, environment and sustainable development* (2nd ed.). Elsevier.

4. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.

5. Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2006). *Solar energy: Fundamentals, design, modeling and applications*. Narosa Publishing.

6. Chandel, S. S., & Pratihar, D. K. (2020). Energy and exergy analysis of hybrid renewable energy systems for drying applications. *Renewable Energy, 150*, 1069–1082. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.056

7. Singh, P., & Tiwari, G. N. (2018). Exergy analysis of solar dryers: A review. *Journal of Cleaner Production, 180*, 109–123. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.023

8. IEA. (2022). *Renewable energy statistics 2022*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/renewable-energy-statistics-2022

9. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.

10. Jamil, A., Rehman, S., & Alam, M. (2019). Solar-assisted hybrid drying systems for agricultural products: Energy, exergy, and economic assessment. *Applied Thermal Engineering, 158*, 113762. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113762

11. Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., & Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 120*, 59–80. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037

12. davodalmosavi, S. O. , Rafiee, S. and Jafari, A. (2023). Modeling of peach production energy using machine learning in Nazarabad township, Alborz province. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, *54*(1), 53-71. doi: 10.22059/ijbse.2023.360300.665512