Research Article

Agricultural Engineering., 48(4) (2025) 647- 662 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2026.51055.1789 ISSN (E): 2588-5944

Performance Evaluation of a Solar Dryer Equipped with Heat Pump and Collector with Flat Side Reflectors in Mint Drying Process

M.R. Abbasi[1], R. Tabatabaeekoloor[2], J. Hashemi[2]and A. Motevali[2]

1. MSc student in Renewable energy, Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2. Associate Professor., Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

Received: 3 November 2025 Accepted: 21 February2026 *Corresponding Author: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

Abstract

Introduction: Drying is one of the most important post-harvest processes for medicinal plants, particularly for heat-sensitive species like peppermint (Mentha piperita). Currently, the common methods of drying medicinal plants in Iran are divided into two main categories: traditional methods (using direct sunlight) and industrial methods (using thermal dryers). Traditional methods face several limitations, including long drying time (4 to 7 days), exposure to environmental pollutants, insect and bird attacks, non-uniform humidity changes, and complete dependence on atmospheric conditions. On the other hand, industrial methods, although they have a higher drying speed, have significant energy consumption (2-3 kWh per kilogram of product) and are associated with greenhouse gas emissions and high operating costs. Traditional drying methods face challenges including high energy consumption, long processing times, and quality degradation. This research comprehensively investigates an innovative hybrid solar-assisted heat pump dryer integrated with flat mirror concentrators to address these limitations while promoting sustainable energy use in agricultural processing.

Materials and Methods: This research was conducted to evaluate the performance of a combined solar-heat pump dryer equipped with reflecting mirrors for drying mint leaves. The experimental system comprised four main components: a closed-cycle drying unit with heat pump recovery, a three-pass solar air collector, flat side reflectors, and an advanced monitoring and control system. The solar collector featured a black-painted aluminum absorber plate with triple-pass airflow configuration and eight aluminum fins at 48° angle. Two flat glass mirrors (0.96 m² each) were mounted at 60° angle for solar concentration. Comprehensive experiments were conducted using a factorial design with three primary factors: drying temperature (40, 50, 60°C), heat pump application (with/without), and flat side reflectors (with/without). The fresh mint leaves (100 g samples) were dried until reaching 15% moisture content (wet basis), with continuous monitoring of thermal parameters, energy consumption, and mass transfer kinetics. Various parameters including drying time, collector inlet and outlet air temperatures, drying chamber temperature, relative air humidity, solar radiation intensity and electrical energy consumption were measured. Performance indices including collector thermal efficiency, drying efficiency, specific moisture absorption rate and heat pump performance coefficient were calculated. The obtained data were analyzed using SPSS statistical software and means were compared using Duncan's multiple range test at a significance level of 5%.

Results and Discussion: Analysis of variance of different experimental factors on the thermal efficiency of the solar collector showed that the effect of temperature, heat pump, flat side reflectors, and the interaction effect of temperature and heat pump, temperature and reflecting mirrors, and temperature and

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

heat pump and mirror on the drying time was statistically significant at the 1% level. The results of the study showed that the use of reflecting mirrors and heat pumps had a significant impact on improving the thermal efficiency of the solar collector. The average efficiency of the solar collector without the use of flat side reflectors was measured at 29.7%, while with the use of flat side reflectors this value increased to 36%. The use of a heat pump alone also increased the thermal efficiency of the collector by 10%. The highest thermal efficiency was related to the treatment at 40 ° C in the case of using flat side reflectors, which was measured at 49.1 and 48.5% in the two conditions of using and not using a heat pump, respectively. The integrated system demonstrated remarkable performance improvements. Simultaneous application of heat pump and flat side reflectors achieved an 76% reduction in drying time. The flat side reflectors individually contributed to 21.2% improvement in thermal efficiency, while the heat pump alone provided 10.1% efficiency gain. Maximum drying efficiency of 6.08% and superior SMER of 0.087 kg/kWh were obtained at 60°C with both subsystems operational. Energy consumption analysis revealed 61.2% reduction under optimal conditions. The enhanced performance is attributed to improved heat transfer through mirror concentration and efficient energy recovery via the heat pump system, which reduced relative humidity and increased drying potential.

Conclusion: The hybrid solar-heat pump dryer with flat flat side reflectors presents a technologically advanced and environmentally sustainable solution for medicinal plant processing. The system achieves substantial reductions in drying time and energy consumption while maintaining product quality through controlled temperature conditions. This research contributes to sustainable agriculture by demonstrating the practical integration of renewable energy technologies for food and pharmaceutical applications, with potential for significant economic and environmental benefits in medicinal plant processing industries.

Keywords: Solar drying, Heat pump, Mint leaves, Flat side reflectors, Renewable energy, Energy efficiency

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد خشک کن خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی و آینههای تخت کمکی در فرایند خشک کردن نعنا

محمد رضا عباسی[۱]، سید رضا طباطبایی کلور[۲]، جعفر هاشمی[۲] و علی متولی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد انرژی های تجدید پذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:

خشک کن خورشیدی،

پمپ حرارتی،

آینه های تخت کمکی،

برگ نعنا،

انرژی تجدیدپذیر،

بازده انرژی

* عهده دار مکاتبات

Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

چکیده

استفاده از آینه‌های تخت کمکی در خشک کن‌های خورشیدی راهکار موثری برای افزایش کارایی و بهینه سازی انرژی است. در این پژوهش، عملکرد یک خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-پمپ حرارتی مجهز به آینه‌های بازتاب کننده برای خشک کردن برگ‌های نعنا مورد بررسی تجربی قرار گرفت. دستگاه طراحی‌شده شامل یک کلکتور خورشیدی سه‌گذره، پمپ حرارتی و سیستم آینه‌های تخت کمکی تخت بود. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور اصلی انجام شد. فاکتور اول دمای خشک‌کردن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، فاکتور دوم استفاده یا عدم استفاده از پمپ حرارتی و فاکتور سوم استفاده یا عدم استفاده از آینه‌های تخت کمکی بود. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی تأثیر قابل توجهی بر بهبود پارامترهای انرژی دارد. استفاده همزمان از پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی موجب کاهش ۷۶ درصدی زمان خشک‌شدن شد. بیشترین بازده حرارتی (۴۹/۱٪) در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آینه‌های تخت کمکی حاصل شد. بیشترین نرخ استخراج رطوبت ویژه (SMER) در تیمار با دمای ۶۰ درجه در شرایط استفاده از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی با مقدار ۰/۰۸۷ (کیلوگرم بر کیلووات ساعت) بوده است. این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد برای خشک‌کردن گیاهان دارویی حساس به حرارت مورد استفاده قرار گیرد.

مقدمه

خشک کردن به عنوان یکی از اساسی‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی و گیاهان دارویی در جهان شناخته می‌شود [۱]. این فرآیند با کاهش محتوای رطوبتی محصول به سطحی ایمن، از فساد میکروبی، فعالیت‌های آنزیمی و اکسیداسیونی جلوگیری کرده و امکان نگهداری طولانی‌مدت را فراهم می‌کند [۲]. اهمیت این فرآیند تا حدی است که تخمین

زده می‌شود حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از میوه‌ها و سبزیجات در زنجیره تأمین به دلیل کمبود زیرساخت‌های مناسب خشک‌کردن از بین می‌روند [۳].

در ایران با توجه به اقلیم مناسب و تنوع آب‌وهوایی، سالانه مقادیر قابل توجهی از گیاهان دارویی تولید می‌شود که متأسفانه بخش عمده‌ای از این محصولات به دلیل روش‌های نامناسب خشک‌کردن و نگهداری، دچار افت کیفیت و کاهش مواد مؤثره می‌شوند [۴]. بر اساس آمارها، تنها در زمینه گیاه نعنا، سالانه حدود ۲۰ درصد از محصول تولیدی به دلیل روش‌های نادرست خشک‌کردن از بین می‌رود [۵].

نعنا (*Mentha piperita*) به عنوان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین گیاهان دارویی در جهان، حاوی ترکیبات حساس به حرارت مانند منتول (۲۵-۷۵٪)، منتون (۱۴-۳۶٪) و سینئول (۳/۵٪-۱۴) است که در دمای بالای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت تجزیه می‌شوند [۶]. مطالعات نشان داده‌اند که خشک‌کردن نعنا در دمای کنترل‌شده و پایین می‌تواند تا ۴۰ درصد از اتلاف مواد مؤثره جلوگیری کرده و کیفیت نهایی محصول را به طور قابل توجهی بهبود بخشد [۷].

در حال حاضر، روش‌های متداول خشک کردن گیاهان دارویی در ایران به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های سنتی (استفاده از نور مستقیم خورشید) و روش‌های صنعتی (استفاده از خشک‌کن‌های حرارتی). روش‌های سنتی با محدودیت‌های متعددی از جمله زمان طولانی خشک‌شدن (۴ تا ۷ روز)، قرار گرفتن در معرض آلودگی‌های محیطی، حمله حشرات و پرندگان، تغییرات غیریکنواخت رطوبت و وابستگی کامل به شرایط جوی مواجه هستند [۸]. از سوی دیگر، روش‌های صنعتی اگرچه سرعت خشک‌شدن بالاتری دارند، اما مصرف انرژی قابل توجهی داشته (به ازای هر کیلوگرم محصول ۲-۳ کیلووات‌ساعت) و با انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های عملیاتی بالا همراه هستند [۹].

با توجه به چالش‌های پیش‌رو از جمله افزایش قیمت حامل‌های انرژی، آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، و ضرورت حرکت به سمت توسعه پایدار، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی به عنوان یک جایگزین مناسب و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. ایران با داشتن بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در سال و متوسط تابش ۱۸۰۰-۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال، پتانسیل بالایی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی دارد [۱۱].

خشک‌کن‌های خورشیدی با بهره‌گیری از انرژی رایگان و در دسترس خورشید، امکان خشک‌کردن محصولات را با هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر و آلودگی کمتر فراهم می‌کنند [۱۲]. اما این سیستم‌ها نیز با چالش‌هایی مانند وابستگی به شرایط جوی، عدم کارایی در شب و روزهای ابری، و کنترل دشوار دمای عملیاتی مواجه هستند [۱۳].

استفاده از بازتاب کننده‌های خورشیدی مانند آینه‌های تخت می‌تواند شدت تابش رسیده به کلکتور را تا ۶۰ درصد افزایش داده و عملکرد حرارتی سیستم را بهبود بخشد [۱۴].

اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه خشک‌کن‌های خورشیدی و پمپ حرارتی به صورت جداگانه انجام شده است، اما مطالعات محدودی به بررسی ترکیب همزمان این دو فناوری همراه با آینه‌های بازتاب کننده پرداخته‌اند. به‌ویژه در مورد خشک‌کردن گیاهان حساس به حرارت مانند نعنا، که حفظ کیفیت و مواد مؤثره آن از اهمیت بالایی برخوردار است، نیاز به سیستم‌های خشک‌کن با کارایی بالا، دمای کنترل‌شده و مصرف انرژی بهینه به شدت احساس می‌شود [۱۵].

در زمینه خشک کردن نعنا با سیستم‌های خورشیدی، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در یک مطالعه، بررسی خشک‌کن خورشیدی برای نعنا نشان داد که افزایش دمای هوا در محدوده ۴۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد

موجب کاهش زمان خشک شدن از ۱۶۴ به ۱۰۵ دقیقه و صرفه‌جویی ۲۵ درصدی در انرژی می‌شود [۱۶]. مطالعه دیگری روی اثر روش‌های مختلف خشک کردن نعنا گزارش کرد که روش خشک کردن تاثیر معنی‌داری بر مدت زمان خشک شدن دارد و زمان خشک شدن در خشک‌کن خورشیدی در دمای ۳۰ درجه، ۲۸۰ دقیقه بوده که با افزایش دما کاهش می‌یابد [۱۷].

در زمینه طراحی بازتاب کننده‌ها، پژوهشی نشان داد که بازتاب کننده تخت در زاویه ۶۰ درجه یکنواخت‌ترین الگوی تابش را ایجاد می‌کند [۱۸]. مطالعه دیگری روی ویژگی‌های خشک‌کردن نعنا در خشک‌کن خورشیدی گزارش کرد که نسبت مصرف انرژی بین ۷/۸۲ تا ٪ ۴۶/۸۵ متغیر است [۱۹].

در حوزه سیستم‌های ترکیبی، تحقیقی بر روی ترکیب پمپ حرارتی و خورشیدی گزارش کرد که این سیستم بازده حرارتی متوسط ٪ ۳۰/۹ دارد [۲۰]. بررسی خشک‌کن هوای خورشیدی دوگذر نشان داد که بالاترین کارایی حرارتی کلکتور ٪ ۸۳/۵۶ بوده است [۲۱]. همچنین مطالعه روی خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم و سه گذر گزارش کرد که دمای حداکثر جمع‌کننده به ۶۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد [۲۲].

در زمینه استفاده از باله و بهبود عملکرد، پژوهشی نشان داد که استفاده از باله[1] در گرم کن هوای خورشیدی باعث بهبود بازده حرارتی می‌شود [۲۳]. مطالعه روی سیستم خشک‌کن مدولار[2] با سه عبور گزارش کرد که در روزهای آفتابی دمای خروجی بین ۹۰-۱۰۱ درجه سانتی‌گراد است [۲۴]. همچنین مطالعه‌ای در زمینه خشک‌کن خورشیدی نیمه‌فعال با آینه‌های جانبی گزارش کرد که افزایش قابل توجهی در دمای هوای خشک‌کن مشاهده شده است [۲۵].

در تحقیقی بر روی خشک‌کن خورشیدی با سیستم ردیاب و بازتاب کننده استوانه‌ای-پارابولیک نشان داده شد که این سیستم می‌تواند تا دمای ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد در نقطه تمرکز دست یابد [۲۶]. مطالعه دیگری در زمینه جمع‌کننده‌های هوای خورشیدی با طراحی‌های مختلف نشان داد که گرم‌کن با یک شیشه[3] در تابستان بازده حرارتی بهتری دارد [۲۷].

بررسی عملکرد خشک‌کن خورشیدی با جابجایی اجباری غیرمستقیم نشان داد که افزودن آینه‌های تخت کمکی به بستر جاذب رطوبت، پتانسیل خشک‌کردن را ٪۲۰ افزایش می‌دهد [۲۸]. مطالعه‌ای نیز گزارش کرد که خشک‌کن‌های خورشیدی با جابجایی طبیعی از ظرفیت محدودی برخوردارند و نرخ خشک کردن آنها تحت تأثیر شدید شرایط جوی قرار می‌گیرد [۲۹]. جدول (۱) مقایسه پژوهش های انجام شده، پارامترهای عملیاتی و شاخص‌های انرژی را در روش های مختلف خشک کردن نعنا ارائه می‌دهد.

با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه خشک‌کردن نعنا با استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی، رطوبت‌گیر[4] و رفرکتنس ویندو[5]، بررسی همزمان اثر پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی در یک سامانه ترکیبی همراه با تحلیل شاخص‌های انرژی نظیر بازده حرارتی کلکتور، بازده خشک‌شدن و نرخ ویژه استخراج رطوبت (SMER) تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف اصلی این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-پمپ حرارتی مجهز به آینه‌های تخت کمکی برای خشک‌کردن برگ‌های نعنا می‌باشد. در این راستا، اثر پارامترهای مختلف از جمله دمای خشک‌کردن در سه سطح (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، استفاده یا عدم استفاده از پمپ حرارتی و استفاده یا عدم استفاده از آینه‌های تخت کمکی بر شاخص‌های عملکردی مختلف

1- Fin
2- Modular drying system
3- Sngle glass heater
4- Dehumidifier
5- Refractance window

شامل بازده حرارتی کلکتور، زمان خشک‌شدن، بازده خشک‌شدن، نرخ ویژه جذب رطوبت (SMER) و مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش می‌تواند گامی در جهت توسعه فناوری‌های پایدار در صنایع غذایی و دارویی کشور باشد.

مواد و روش ها

این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد یک خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-پمپ حرارتی مجهز به آینه‌های تخت کمکی برای خشک کردن برگ‌های نعنا انجام شد. سیستم طراحی شده در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی و ساخته شد و آزمایش‌ها در بازه زمانی مهر تا آبان ۱۴۰۳ در همین دانشگاه انجام گرفت.

سیستم خشک‌کن ترکیبی

سیستم مورد استفاده در این پژوهش از چهار بخش اصلی تشکیل شده بود. بخش اول واحد خشک‌کن با چرخه هوای بسته بود که شامل یک پمپ حرارتی با کمپرسور ۴/۱ اسب بخار، دمنده گریز از مرکز با توان ۱۹۲ وات و گرم‌کن الکتریکی کمکی با توان ۲۵۰ وات می‌شد. محفظه خشک‌کن با ابعاد ۴۰×۴۰×۵۰ سانتی‌متر از جنس ورق گالوانیزه ساخته شده و با پشم شیشه عایق‌بندی شده بود.

جدول(۱) مقایسه پارامترهای عملیاتی و شاخص‌های انرژی گزارش‌شده در مطالعات خشک‌کردن نعنا

Table(1) Comparison of operational parameters and energy indices reported in mint drying studies

مرجع Reference	نوع خشک کن Dryer Type	دامنه دما Temperature range (°C)	زمان خشک کردن Drying time (min)	بازده حرارتی کلکتور Collector thermal efficiency (%)	نرخ وِژه استخراج رطوبت SMER (kg/kWh)
Kishk et al. (2018) [۳۰]	گلخانه خورشیدی (Solar greenhouse)	35-55	360-600	-	-
Téllez et al. (2021) [۳۱]	خشک‌کن غیرمستقیم خورشیدی با کلکتور (Indirect solar dryer with collector)	45-60	300	-	-
Kaveh et al. (2024) [۳۲]	خشک‌کن رفرکتنس ویندو (Refractance Window dryer)	50-90		-	-
Kannan et al. (2020) [۳۳]	خشک‌کن با رطوبت‌گیر جامد (Dryer with dehumidifier)	35-37	360	35-45	-
Moradi et al. (2020) [۳۴]	خشک‌کن خورشیدی با چرخش آب گرم (Solar dryer with hot water recirculating)	41-54	150-255	-	0.04-0.07

کلکتور خورشیدی

بخش دوم سیستم، کلکتور خورشیدی سه‌گذر [1] بود که از ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر با پوشش سیاه مات به مساحت ۰,۹۶ متر مربع ساخته شد. این کلکتور با یک شیشه دوجداره ۱۲ میلی‌متری پوشانده شده و پشت و لبه‌های آن با پشم شیشه به ضخامت ۱ سانتی‌متر عایق‌بندی شد. طراحی کلکتور به صورت سه گذر با هشت باله آلومینیومی در زاویه ۴۸ درجه بود که موجب افزایش سطح انتقال حرارت و ایجاد تلاطم در جریان هوا می‌شد.

سیستم آینه‌های تخت کمکی

در این پژوهش از دو عدد آینه شیشه‌ای تخت با مساحت ۰/۹۶ متر مربع برای هر یک به عنوان بازتاب کننده استفاده شد. این آینه‌ها در قاب‌های فلزی مستحکم قرار گرفته و در زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق نصب شدند. این زاویه بهینه برای بیشترین بازدهی در جذب و تمرکز تابش خورشیدی بر روی صفحه جاذب کلکتور و با توجه به هزینه ساخت انتخاب شد[۳۵]. آینه‌ها به گونه‌ای تنظیم شدند که پرتوهای خورشید را به صورت یکنواخت بر سطح کلکتور بازتاب کرده و موجب افزایش شدت تابش رسیده به صفحه جاذب جمع کننده خورشیدی شوند.

سامانه پایش و کنترل

بخش چهارم، سامانه پیشرفته پایش و کنترل بود که شامل دوازده حسگر دمای TP05، ترانسمیتر دما و رطوبت مدل TM-1240، دو لودسل 3D-C6L برای اندازه‌گیری جرم محصول و پاورمتر برای سنجش مصرف انرژی می‌شد. این سامانه به یک HMI [2] لمسی متصل بود که امکان نمایش و ثبت پیوسته داده‌ها و همچنین کنترل خودکار پارامترهای عملیاتی را فراهم می‌کرد. این واحد دما را اندازه‌گیری کرده و با مقدار پیش تنظیم شده مقایسه می‌کند. اگر دمای هوای داخل محفظه محصول کمتر از حد مطلوب باشد، واحد HMI گرمکن کمکی را روشن می‌کند و تا زمانی که دمای هوای درون محفظه به مقدار مطلوب برسد، گرمکن فعال می‌ماند. اگر دمای هوای داخل محفظه محصول بیشتر از حد مطلوب شود، واحد HMI به موتور محرک دریچه‌های هوا فرمان می‌دهد و دریچه‌ها باز می‌شوند. در این حالت هوای آزاد با دمای پایین وارد محفظه شده و دمای هوای خشک‌کننده کاهش می‌یابد. به محض اینکه دما به اندازه مطلوب کاهش یافت، HMI به موتور محرک فرمان بسته شدن دریچه‌ها را صادر می‌کند. برای کنترل رطوبت نسبی هوای عبوری، بتدا رطوبت نسبی هوای ورودی به محصول به‌وسیله حسگر رطوبت نسبی نصب شده در کانال هوای مربوطه اندازه‌گیری و با مقدار پیش تنظیم شده در HMI مقایسه می‌شود. اگر رطوبت نسبی هوا از حد مطلوب بیشتر باشد، HMI دریچه‌ها را باز می‌کند تا رطوبت نسبی هوای خشک‌کن کاهش یابد. در جدول (۲) محل قرارگیری هریک از حسگر های مورد استفاده در سامانه کنترل خشک کن مشخص شده است.

روش اجرای آزمایش

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور اصلی انجام شد. داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار آماری spss تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۵٪ انجام شد. فاکتور اول دمای خشک‌کردن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، فاکتور دوم استفاده یا عدم استفاده از پمپ حرارتی و فاکتور سوم استفاده یا عدم استفاده از آینه‌های تخت کمکی بود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، برگ‌های نعنا تازه از بازار محلی شهر ساری تهیه و پس از جداسازی برگ‌های سالم و حذف آلودگی‌های سطحی، در دمای یخچال نگهداری شدند. در هر آزمایش، ۱۰۰ گرم نعنای تازه به صورت لایه نازک روی سینی توری پخش شده و در محفظه خشک‌کن قرار داده شد. فرآیند خشک‌کردن تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۱۵٪ بر پایه تر ادامه یافت.

1- Triple-pass solar collector
2- Human Machine Interface

اندازه‌گیری‌ها و تحلیل داده‌ها

پارامترهای مختلف شامل زمان خشک‌شدن، دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور، دمای محفظه خشک‌کن، رطوبت نسبی هوا، شدت تابش خورشیدی و مصرف انرژی الکتریکی اندازه‌گیری شدند.میانگین تابش خورشید در انجام آزمایش ها ۱۰۰۹ w/m^2و میانگین دمای هوای محیط ۲۴ درجه سانتی گراد بود.

پس از انجام آزمایش‌های مختلف و ثبت داده‌های موردنیاز، از این داده‌ها به‌منظور محاسبه‌ی شاخص‌های عملکردی مختلف برای ارزیابی خشک‌کن استفاده شد.

بازده انرژی از تقسیم انرژی لازم برای تبخیر رطوبت محصول در حال خشک‌شدن به کل انرژی مصرفی در طول فرایند خشک‌شدن از رابطه (۱) به دست می‌آید [۳۶].

$$Energy\ Efficiency = \frac{E_{evaporation}}{E_{total(solar+electrical)}} \quad (۱)$$

که $Energy\ Efficiency$ بازده انرژی، $E_{evaporation}$ انرژی لازم برای تبخیر رطوبت (kJ) و E_{total} کل انرژی خورشیدی و الکتریکی مصرفی (kJ) می باشد. انرژی لازم برای تبخیر رطوبت محصول نیز از رابطه (۲) به دست می آید.

$$E_{evaporation} = h_{fg}.m_{wd} \quad (۲)$$

در این رابطه h_{fg} نشان دهنده گرمای نهان تبخیر (kJ/kg) و m_{wd} جرم آب تبخیر شده (kg) می باشد.

یکی دیگر از شاخص‌های عملکرد خشک‌کن‌های مجهز به پمپ حرارتی، نرخ ویژه‌ی استخراج رطوبت (SMER) است که مقدار آن از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید[۳۷].

$$SMER = \frac{m_{wd}}{E_{total\ (solar+electrical)}} \quad (۳)$$

در این رابطه m_{wd} جرم رطوبت استخراج شده از گیاه بر حسب کیلوگرم و E_{total} مجموع انرژی خورشیدی و الکتریکی مصرفی بر حسب KWh است.

طبق رابطه (۴) از تقسیم مجموع انرژی لازم برای گرم‌کردن محصول در حال خشک‌شدن و انرژی لازم برای تبخیر رطوبت به کل انرژی مصرفی در طول خشک‌شدن بازده خشک‌شدن به دست می‌آید [۳۶].

$$Drying\ Efficiency = \frac{E_{Heating+evaporation}}{E_{total(solar+electrical)}} \quad (۴)$$

$Drying\ Efficiency$ بازده خشک‌شدن (درصد)، $E_{Heating+evaporation}$ مجموع انرژی لازم برای افزایش دمای محصول در حال خشک‌شدن و انرژی لازم برای تبخیر رطوبت (kJ)، E_{total} کل انرژی خورشیدی و الکتریکی مصرفی (kJ) می باشد.

بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۳۸].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{A \times I(t)} \quad (۵)$$

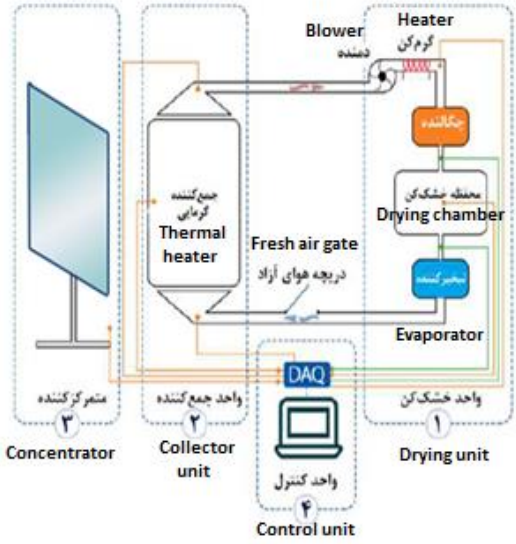
که در آن η_{th} بازده جمع کننده(درصد)، A مساحت جمع کننده خورشیدی(m^2)، $I_{(t)}$ شدت تابش خورشیدی (W/m^2) و $\dot{Q}$ نرخ گرمای مفید جمع کننده(W) است که از رابطه (۶) به دست می آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_P (T_{oc} - T_{ic}) \quad (۶)$$

که در آن $\dot{m}$ دبی جرمی هوای عبوری (kg/m^2)، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت (J/kg°C)، T_{ic} دمای هوای ورودی به جمع کننده(°C)، T_{oc} دمای هوای خروجی از جمع کننده هستند.

در شکل (۱) شماتیک سیستم خشک کن و واحدهای اصلی تشکیل دهنده آن نمایش داده شده است و شکل (۲) نیز تصویر خشک کن به همراه آینه‌های تخت کمکی را نشان می‌دهد. این خشک‌کن در قالب یک طرح تحقیقاتی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی و ساخته شد. خشک‌کن دارای یک سیستم پمپ حرارتی و یک محفظه خشک کردن مجهز به لودسل برای سنجش تغییرات وزن می‌باشد. از یک دمنده گریز از مرکز برای عبور هوا از اواپراتور و ورود آن به داخل کندانسور استفاده شد. سینی در محفظه خشک کن، از فولاد ضد زنگ ساخته شد. سیستم مجهز به مبدل‌هایی برای اندازه گیری وزن، دما و

رطوبت نسبی می‌باشد. از دما سنج نوع K و بادسنج دیجیتال (مدلAR826 ، Qingdao Intelli Instruments Co. Ltd., Qingdao, China) برای اندازه گیری سرعت هوا استفاده شد. داده‌های جمع آوری شده به یک حافظه دیجیتالی سیستم جمع آوری داده منتقل گردید که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد.



شکل (۱) شماتیک سیستم خشک کن ترکیبی
Figure (1) Schematic of the combined drying system



شکل (۲) خشک کن خورشیدی همراه با آینه‌های تخت کمکی
Figure (2) Solar dryer with Flat side reflectors

نتایج و بحث

بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی در حالت‌های مختلف خشک‌کردن

در جدول (۳) تجزیه واریانس فاکتورهای مختلف آزمایش بر بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی ارائه شده است. اثر دما، پمپ حرارتی، آینه‌های تخت کمکی و اثرات متقابل دما و پمپ حرارتی، دما و آینه‌های تخت کمکی و دما و پمپ حرارتی و آینه بر مدت زمان خشک‌شدن در سطح آماری ۱ درصد معنی دار شده است.

نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی تأثیر قابل توجهی بر بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی دارد. میانگین بازده جمع‌کننده خورشیدی بدون استفاده از آینه‌های تخت کمکی ۲۹/۷ درصد اندازه‌گیری شد، در حالی که با استفاده از آینه‌های تخت کمکی این مقدار به ۳۶ درصد افزایش یافت. استفاده از پمپ حرارتی نیز به تنهایی موجب افزایش ۱۰ درصدی بازده حرارتی جمع‌کننده شد. بیشترین بازده حرارتی مربوط به تیمار با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در حالت استفاده از آینه‌های تخت کمکی بود که در دو شرایط استفاده و عدم استفاده از پمپ حرارتی به ترتیب ۴۹/۱ و ۴۸/۵ درصد اندازه‌گیری شد. در حالی که در تحقیقات مشابه خشک کردن نعنا بازدهی جمع کنند بین ۳۵ تا ۴۵ درصد گزارش شده است.

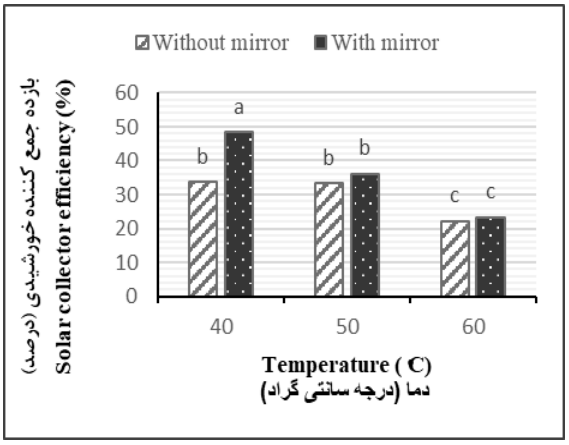
شکل‌های (۳) و (۴) نتایج بازده حرارتی را در دو تیمار استفاده یا عدم استفاده از پمپ حرارتی را نشان می‌دهد.

جدول(۳) تجزیه واریانس فاکتورهای مختلف آزمایش بر بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی

Table (3) Analysis of variance of different experimental factors on the thermal efficiency of the solar collector

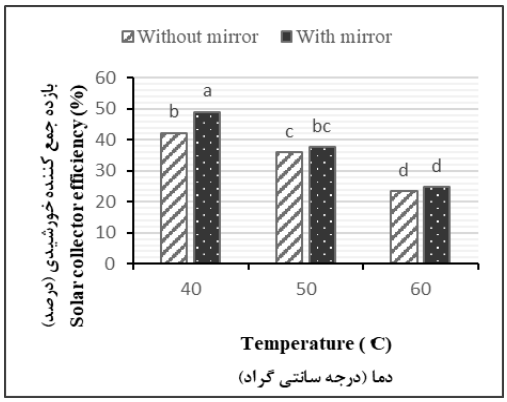
سطح احتمال Probability level	F	میانگین مربعات Mean squars	df	منبع Source
**	108.4	248.82	11	تیمار Treatment
**	486.5	1116.98	2	دما Temperature (A)
**	19.6	44.89	1	پمپ حرارتی Heat pump (B)
**	94.5	217.07	1	آینه تخت کمکی Flat plate reflector (C)
**	8.7	19.97	2	دما*پمپ حرارتی A × B
**	29.6	67.93	2	دما*آینه A × C
*	7.7	17.64	1	پمپ حرارتی*آینه B × C
**	10.4	23.86	2	دما*پمپ حرارتی*آینه A × B × C
		2.30	24	خطا Error

**وجود اختلاف معنی دار در سطح ٪1 — *وجود اختلاف معنی دار در سطح ٪5



شکل (۳) بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی بدون پمپ حرارتی

Figure (3) Thermal efficiency of the solar collector without the heat pump



شکل (٤) بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی با پمپ حرارتی

Figure (3) Thermal efficiency of the solar collector with the heat pump

زمان خشک شدن

در جدول (۴) تجزیه واریانس زمان خشک‌شدن گیاه نعنا در تیمارهای مختلف آزمایش نشان داده شده است. دما، پمپ حرارتی، آینه‌های تخت کمکی و اثرات متقابل دما و پمپ حرارتی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده‌اند.

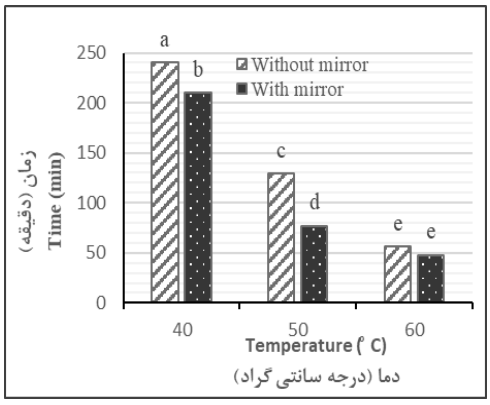
در شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات زمان خشک‌شدن نعنا در تیمارهای مختلف نشان داده شده است که بیشترین زمان مورد نیاز (۲۴۰ دقیقه) در تیمار ۴۰ درجه سانتی گراد بدون استفاده از آینه‌های بازتاب کننده و کمترین زمان (۳۷ دقیقه) در تیمار ۶۰ درجه سانتی گراد با استفاده همزمان از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی مشاهده شد. به طور کلی، با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، زمان مورد نیاز برای خشک شدن به طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش به دلیل افزایش اختلاف فشار بخار، میان هوای خشک‌کننده و محصول رخ می‌دهد که باعث افزایش نرخ تبخیر آب از سطح محصول شده و در نتیجه، سرعت فرآیند خشک شدن را بیشتر می‌کند [۳۹]. با افزایش دمای هوای ورودی، دمای محصول سریع تر افزایش یافته که این عمل آهنگ تبخیر رطوبت را افزایش داده و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [۴۰]. استفاده از پمپ حرارتی به طور میانگین موجب کاهش ۲۴ درصدی زمان خشک‌شدن گردید که دلیل اصلی آن کاهش رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده و بهبود پتانسیل خشک‌کنندگی بود [۴۱]. همچنین به کارگیری آینه‌های تخت کمکی به طور متوسط ۲۲ درصد در کاهش زمان خشک‌شدن مؤثر بود که ناشی از افزایش دمای عملیاتی کلکتور و بهبود یکنواختی توزیع حرارت بود [۴۲].

جدول(٤) تجزیه واریانس زمان خشک‌شدن گیاه نعنا در تیمارهای مختلف

Table (4) Analysis of variance of mint plant drying time in different treatments

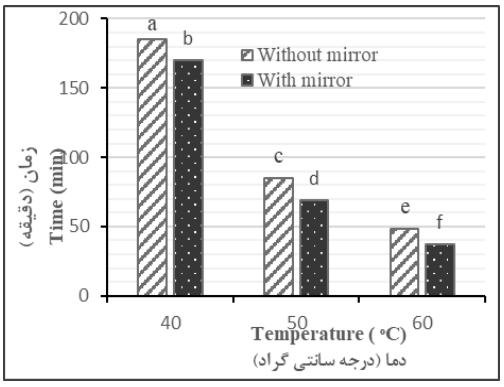
منبع Source	df	میانگین مربعات Mean squars	F	سطح احتمال Probability level
تیمار Treatment	11	14770.2	204.9	**
دما Temperature (A)	2	76878.4	1066.6	**
پمپ حرارتی Heat pump (B)	1	4149.5	57.6	**
آینه تخت کمکی Flat plate collector (C)	1	2475.1	34.3	**
دما*پمپ حرارتی A × B	2	816.2	11.3	**
دما*آینه A × C	2	134.9	1.9	ns
پمپ حرارتی*آینه B × C	1	27.6	0.4	ns
دما*پمپ حرارتی*آینه A × B × C	2	80.6	1.1	ns
خطا Error	24	72.1		

**وجود اختلاف معنی دار در سطح 1٪ | *وجود اختلاف معنی دار در سطح 5٪ | ns عدم وجود اختلاف معنی دار



شکل (٤) تغییرات زمان خشک‌شدن نعنا بدون پمپ حرارتی

Figure (5) Changes in mint drying time without the heat pump

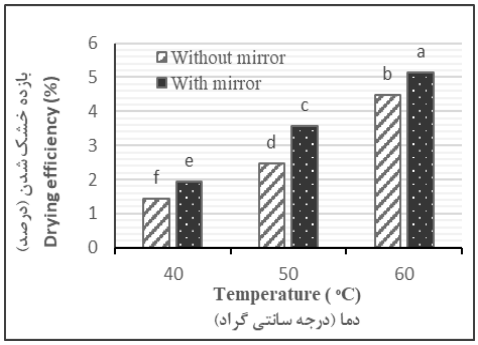


شکل (٥) تغییرات زمان خشک‌شدن نعنا با پمپ حرارتی

Figure (6) Changes in mint drying time with the heat pump

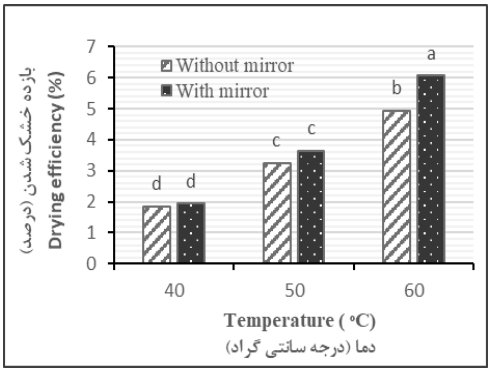
بازده خشک شدن

نتایج مربوط به بازده خشک‌شدن در تیمارهای تعریف شده در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. بیشترین بازده خشک‌شدن مربوط به تیمار ۶۰ درجه با استفاده از پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی با ۶/۰۸ درصد بوده است. افزایش دما و استفاده از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی سه عامل تأثیرگذار در افزایش بازده خشک‌شدن در تمامی تیمارها بوده است. استفاده از پمپ حرارتی۲۴ درصد و آینه‌های تخت کمکی ۳۱ درصد به طور میانگین بازده خشک‌شدن را افزایش داده است. آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی نیز به طور میانگین با افزایش ۴۰ درصدی بازده خشک‌کن بیشترین تأثیر را نسبت به دیگر تیمارها داشته است. با افزایش دمای تیمار بازده خشک‌شدن نیز روند صعودی داشت. سرعت بالای خشک‌شدن نمونه‌ها بدلیل اختلاف گرادیان حرارتی بین محصول و دمای خشک‌کردن اتفاق می‌افتد و به دنبال آن زمان خشک‌شدن و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد [۴۳].



شکل (٦) بازده خشک‌شدن نعنا بدون پمپ حرارتی

Figure (7) Drying efficiency of mint without the heat pump



شکل (۷) بازده خشک‌شدن نعنا با پمپ حرارتی
Figure (8) Drying efficiency of mint with the heat pump

نرخ ویژه استخراج رطوبت

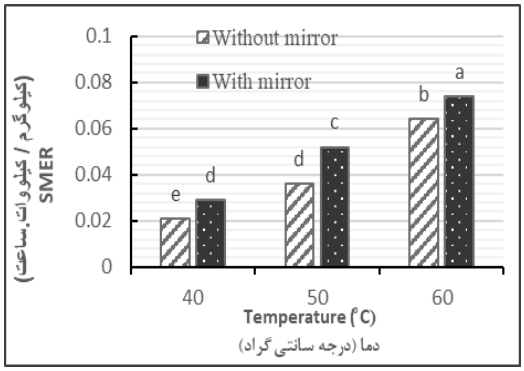
همان طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود با استفاده آینه‌های تخت کمکی ، پمپ حرارتی و افزایش دما، نرخ ویژه استخراج رطوبت افزایش می‌یابد. به طور میانگین استفاده از آینه‌های تخت کمکی باعث افزایش ۳۳ درصدی نرخ ویژه استخراج رطوبت می‌شود. در تیمارهای استفاده از پمپ حرارتی میانگین افزایش SMER ۲۵ درصد بود که با تحقیقات پیشین مطابقت دارد [۴۴]. آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی در تیمار استفاده همزمان از آینه های تخت کمکی و پمپ حرارتی بیشترین تأثیر را بر نرخ ویژه استخراج رطوبت داشته‌اند و به طور میانگین باعث افزایش ۴۰ درصدی این شاخص شده‌اند. بیشترین نرخ ویژه استخراج رطوبت در تیمار با دمای ۶۰ درجه در شرایط استفاده از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی با مقدار ۰/۰۸۷ (کیلوگرم بر کیلووات ساعت) بوده است که از مقادیر گزارش‌شده در تحقیقات پیشین (حدود ۰/۰۴ تا ۰/۰۷ کیلوگرم بر کیلووات ساعت) بالاتر است [۴۴]. این اختلاف را می‌توان ناشی از کاهش مصرف انرژی ویژه به دلیل ترکیب پمپ حرارتی و انرژی خورشیدی دانست.

بازده انرژی

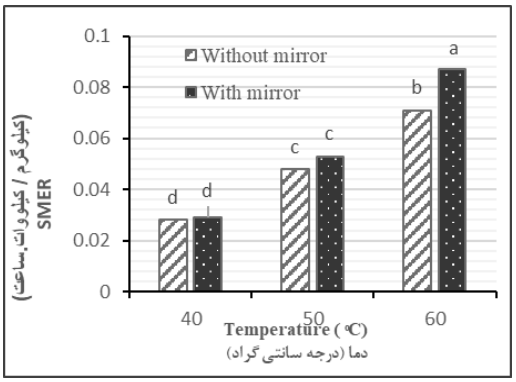
تغییرات بازده انرژی در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده است. بیشترین بازده انرژی متعلق به تیمار ۶۰ درجه و در شرایط استفاده همزمان از پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی با مقدار ۵/۴۷ درصد و کمترین بازده مربوط به تیمار ۴۰ درجه با مقدار ۱/۳۴ درصد است. طبق نتایج با افزایش دما، استفاده از آینه‌های تخت کمکی و استفاده از پمپ حرارتی بازده انرژی افزایش‌یافته است. استفاده از پمپ حرارتی به طور میانگین ۲۴ درصد بازده انرژی را افزایش داده است درحالی‌که تأثیر استفاده از آینه‌های تخت کمکی بیشتر بوده و ۳۱ درصد میانگین بازده انرژی را افزایش داه است. بیشترین اثر مربوط به استفاده هم‌زمان از آینه‌های تخت کمکی و پمپ حرارتی با ۴۰ درصد افزایش است.

برق مصرفی

میزان برق مصرفی دستگاه را می‌توان در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده کرد. بیشترین مصرف برق مربوط به تیمار ۴۰ درجه با ۱/۰۴۸ (کیلووات ساعت) و کمترین میزان آن که ۰/۴۰۶ (کیلووات ساعت) بود متعلق به تیمار۵۰ درجه است. افزایش دمای هوای خشک‌کن از یک طرف نیازمند مصرف توان الکتریکی بالاتر در گرمکن کمکی و پمپ حرارتی است و از طرف مقابل با کاهش زمان خشک‌شدن و کاهش مصرف از گرمکن کمکی و پمپ حرارتی سبب کم شدن انرژی مصرفی می‌شود [۴۵]. به این دلیل است که الگوی خاصی در مصرف برق دستگاه خشک‌کن تحت شرایط مختلف آزمایش مشاهده نمی‌شود و به نظر می‌رسد شرایط محیطی (میزان تابش خورشید و دمای محیط) در زمان اجرای آزمایشات در مصرف برق دستگاه تأثیر گذار بوده است.

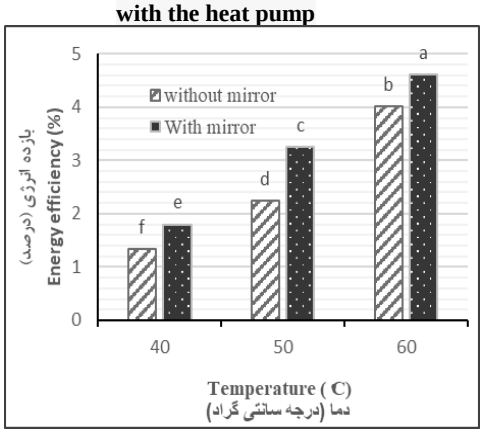


شکل (۸) نرخ ویژه استخراج رطوبت بدون پمپ حرارتی
Figure (9) Specific moisture extraction rate without the heat pump



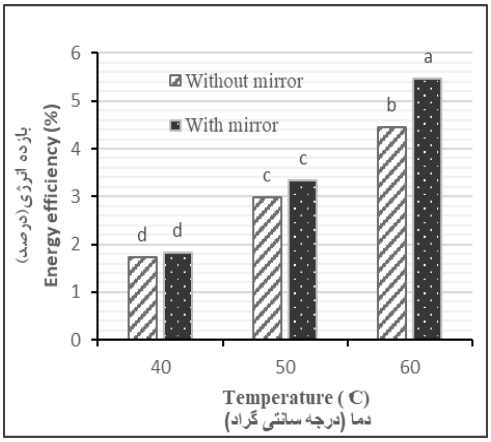
شکل (۹) نرخ ویژه استخراج رطوبت با پمپ حرارتی

Figure (10) Specific moisture extraction rate with the heat pump



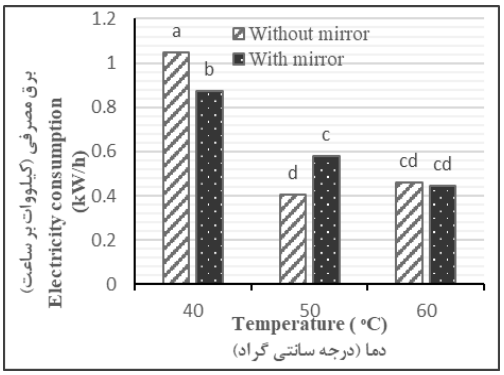
شکل ۱۰) تغییرات بازده انرژی بدون پمپ حرارتی

Figure (11) Changes in energy efficiency without the heat pump



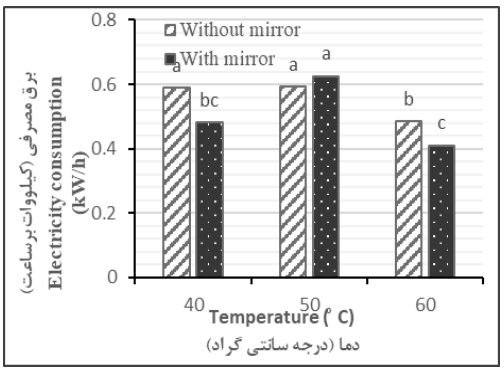
شکل (۱۱) تغییرات بازده انرژی با پمپ حرارتی

Figure (12) Changes in energy efficiency with the heat pump



شکل (۱۲) میزان برق مصرفی بدون پمپ حرارتی

Figure (13) Electricity consumption without the heat pump



شکل (۱۳) میزان برق مصرفی با پمپ حرارتی

Figure (14) Electricity consumption with the heat pump

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که استفاده همزمان از پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی موجب بهبود چشمگیر شاخص‌های عملکردی سیستم می‌شود. به طور مشخص، زمان خشک‌شدن تا ۷۶ درصد کاهش یافته و بازده حرارتی کلکتور در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار خود را داشت. بهترین عملکرد سیستم در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط استفاده همزمان از پمپ حرارتی و آینه‌های تخت کمکی حاصل شد. در این شرایط، بازده خشک‌شدن به ۶/۰۸ درصد و نرخ ویژه جذب رطوبت به ۰/۰۸۷ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت رسید. همچنین مصرف انرژی الکتریکی در این تیمار ۶۱/۲ درصد کاهش نشان داد.

Reference

1. Prusinowska, R. and Smigielski, K. 2015. Losses of essential oils and antioxidants during the drying of herbs and spices - A review. Engineering Science and Technology, 2(17): 51–62. https://doi: 10.15611/nit.2015.2.05
2. Chakraborty, R. and Dey, T. 2016. Drying protocols for traditional medicinal herbs: a critical review. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 4(4):311–319. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309
3. Hasan, M.U., Malik, A.U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., and Amjad, W. 2019. Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. Journal of Food Processing and Preservation, 43(12):e14280. https://doi.org/10.1111/jfpp.14280
4. Omisbeygi, R. 2005. Production and processing of medicinal plants. Tird edition, Astan Ghods Publications, Mshhad, Iran. (In Persian)
5. 5.Hedayat, M., Mortezapour, H., and Shamsi, M. 2015. Investigating the performance of solar dryer equipped with a thermal recycle for mint drying. Iranian Biosystem Engineering, 46(4): 379-388. (In Persian with English Abstract).
6. Loolaie, M., Moasefi, N., Rasouli, H., and Adibi, H. 2017. Peppermint and its functionality: A review. Archieve Clinical Microbiology, 8(4):54-67. https://doi:10.4172/1989-8436.100053
7. Djamila, B., Zohra, K.F., Lahcene, K., and Zohra, R.F. 2021. Drying methods affect the extracts and essential oil of Mentha aquatica L. Food Bioscience, 41:101007. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101007
8. Khallaf, A.E. and El-Sebaii, A.A. 2022. Review on drying of the medicinal plants (herbs) using solar energy applications. Heat Mass Transfer, 58(8):1411–1428. https://doi.org/10.1007/s00231-022-03191-5
9. Walsh, M.J., Gerber, L., Shete, N., Prakash, A. and Salim, U. 2018. Financial tradeoffs of energy and food uses of algal biomass under stochastic conditions. Applied Energy, 210:591–603. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.060
10. El Hage, H., Herez, A., Ramadan, M., Bazzi, H. and Khaled, M. 2018. An investigation on solar drying: a review with economic and environmental assessment. Energy 157:815–829. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.197
11. Sabziparvar, A.A. and Shetaee, H. 2007. Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. Energy 32(5):649–655. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.05.005
12. Mokhtarian, M., Tavakolipour, H. and Kalbasi-Ashtari, A. 2016. Energy and exergy analysis of a solar dryer for mint leaves. Journal of Food Processing and Preservation, 40(6):1214–1225. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.067 (In Persian with English Abstract).
13. Chua, K.J. and Chou, S.K. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. Trends in Food Science and Technology, 14(12):519–528. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.003
14. Amanlou, Y., Tavakoli, T., Ghobadian, B. and Najafi, G. 2013. Design of solar concentrators to increase intensity of radiation on the photovoltaic panel. 8th National Biosystem Congress, Mashhad, (In Persian with English Abstract).
15. Şevik, S. 2014. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. Solar Energy, 105:190–205. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.037
16. Mortezapour, H., and Shamsi, M. 2015. Investigation the performance of solar dryer equipped with a thermal recycle for mint drying. Iranian Biosystem Engineering, 46(4): 379-388. https://doi.org/10.22067/jam.2024.90300.1298 (In Persian with English Abstract).
17. Bahmanpour, H., Sajadie, S.M., Sheykhdavoodi, M. and Zolfaghari, M. 2015. Comparison of mint drying in solar and vaccum dryer. The 3rd National Conference on Agriculture and Environment. Tehran. (In Persian with English Abstract).
18. Amanlou, Y., Tavakoli, T., Ghobadian, B. and Najafi, G. 2013. Design of solar concentrators to increase intensity of radiation on the photovoltaic panel. 8th National Biosystem Congress, Mashhad. (In Persian with English Abstract).

19. Akpinar, E.K. 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. Energy Conversion and Management, 51(12):2407–2418. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.05.005

20. Yahya, M., Fudholi, A., Hafizh, H., and Sopian, K. 2016. Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava. Solar Energy, 136:606–613. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.049

21. Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E.C., Arslan, E. and Tuncer, A.D. 2019. Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. Solar Energy, 180:537–549. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.049

22. Kesavan, S., Arjunan, T.V., and Vijayan, S. 2019. Thermodynamic analysis of a triple-pass solar dryer for drying potato slices. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 136(1):159–171. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7747-0

23. Murali, G., Sundari, A.T., Raviteja, S., Chanukyachakravarthi, S. and Tejpraneeth, M. 2020. Experimental study of thermal performance of solar aluminium cane air heater with and without fins. Materials Today Proceedings, 21:223–230. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.224

24. Ezeike, G.O. 1986. Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system. Energy in Agriculture, 5:1–20. https://doi.org/10.1016/0167-5826(86)90002-1

25. Kishor, P.U. and Raut, P. 2023. Design and fabrication of multi-purpose solar dryer with mirror. International Journal of Engineering Research and Technology, 12(5): 324-336. https://doi.org/10.1006/j.ert.2023.01.065

26. Salah, S.B., Benseddik, A., Meneceur, N., Zine, A. and Deghoum, K. 2024. Design and realization of a new solar dryer assisted by a parabolic trough concentrator (PTC) with a dual-axis solar tracker. Solar Energy, 283:113001. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113001

27. Gill, R.S., Singh, S., and Singh, P.P. 2012. Low cost solar air heater. Energy Conversion and Management, 57:131–142. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.019

28. Shanmugam, V., and Natarajan, E. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. Applied Thermal Engineering 27(8):1543–1551. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.018

29. Tiris, C., Tiris, M. and Dincer, I. 1996. Experiments on a new small-scale solar dryer. Applied Thermal Engineering, 16(3):183–187. https://doi.org/10.1016/1359-4311(95)00048-I

30. Kishk, S.S., Abd El‐Reheem, S.S. and ElGamal, R. A. 2018. Experimental and mathematical modeling study for solar drying of mint (Mentha spicata L.). Journal of Agricultural Engineering, 35(4), 1327–1344. https://doi.org/10.21608/mjae.2018.95279

31. Téllez, M.C., Castillo‐Téllez, B., Pérez Gerardo, A.M., Marzoug, R. and Álvarez, D.C. 2021. Design of an indirect dryer with coupling of solar collectors and its thermal characterization by drying the mint leaves (Mentha spicata). European Journal of Sustainable Development, 10(1), 411–419. https://doi.org/10.14207/ejsd.2021.v10n1p411

32. Kaveh, M., Zomorodi, S., Mariusz, S. and Dziwulska‐Hunek, A. 2024. Determination of drying characteristics and physicochemical properties of mint (Mentha spicata L.) leaves dried in Refractance Window. Foods, 13(18), 2867. https://doi.org/10.3390/foods13182867

33. Kannan, V.S., Arjunan, T.V. and Vijayan, S.(2022. Drying characteristics of mint leaves (Mentha arvensis) dried in a solid desiccant dehumidifier system. Journal of Food Science and Technology, 58(2): 777–786. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04595-z

34. Moradi, M., Fallahi, M.A., and Mousavi Khaneghah, A. 2020. Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of mint leaves by a hot water recirculating solar dryer. Journal of Food Process Engineering, 43(1). https://doi.org/10.1111/jfpe.13181

35. Amanlou, Y., Tavakkoli Hashjin, T., Ghobadian, B. and Najafi, G. 2013. Design of a solar concentrator to increase radiation intensity on a photovoltaic panel. In Proceedings of the 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran, Mashhad, Iran. (In Persian with English Abstract).

36. Vieira, M.G.A., Estrella, L. and Rocha, S.C.S. 2007. Energy Efficiency and Drying Kinetics of Recycled Paper Pulp. Drying Technology, 25:1639-48. https://doi.org/10.1080/07373930701590806

37. Wang, W., Li, M., Hassanien, R.H.E., Wang, Y., and Yang, L. 2018. Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. Applied Thermal Engineering, 134:310–21. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01. 115.

38. Biondi, P., Cicala, L., and Farina, G. 1988. Performance analysis of solar air heaters of conventional design. Solar Energy, 41, 101-107

39. Bala, B.K., Hoque, M.A., Hossain, M.A. and Uddin, M. 2010. Drying characteristics of asparagus roots (Asparagus racemosus Wild.). Drying Technology, 28(4): 533- 544. https://doi.org/10.1080/07373931003618899

40. Singh, P. and Pandey, J.P. 2011. Experimental investigation of the performance of a solar dryer with natural convection. International Journal of Engineering Science and Technology 3(5):4055–63. https://doi:10.1016/j.renene.2006.10.011

41. Sarkar, J., Bhattacharyya, S. and Ramgopal, M. 2006. Heat pump dryer: Part 1. Experimental results. Drying Technology, 24(12):1593–600. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114

42. Shanmugam, V. and Natarajan, E. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. Applied Thermal Engineering 27(9):1543–51. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.018

43. Motevali, A., Hashemi, J., and Kiani, R. 2022. Investigating the thermodynamic parameters and microwave pretreatment in rosmary drying. Energy Management and Engineering, 7(2): 42-51. https://doi.org/10.1016/j.eme.2022.05.013

44. Sarkar, J., Bhattacharyya, S. and Ramgopal, M. 2006. CO_2 heat pump dryer: Part 2. Validation and simulation results. Drying Technology, 24: 1642-1654. https://doi.org/10.1080/07373930601030945.

45. Razmipour, M., Alavi, N., Mortezapour, H., and Ghazanfari, A. 2015. Evaluation of solar dryer performance equipped with concentrator with drying air control system. Journal of Agricultural Machinery, 5(2): 16-23. https://doi.org/10.22067/jam.v5i1.26691 (In Persian with English Abstract).