

ارزیابی یک سیستم خشک‌کن ترکیبی خورشیدی مبتنی بر بازیابی حرارت جهت کاهش مصرف انرژی

زهرا اسمعیلی^{۱*}، داود خدابخشی شلمزاری^۲

۱- پژوهشگر گروه پژوهشی مدیریت انرژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، Zaesmaeili@nri.ac.ir

۲- کارشناس برق و مدیر پروژه نیروگاه‌های خورشیدی شرکت شهرک‌های صنعتی استان تهران، ایران،

khodabakhshi@tehraniec.ir

خلاصه

با توجه به چالش‌های جهانی انرژی و نیاز به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر در صنایع غذایی اهمیت ویژه‌ای یافته است. این پژوهش به ارزیابی عملکرد یک سیستم خشک‌کن ترکیبی خورشیدی مجهز به واحد بازیابی حرارت) بر پایه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک یا (MCHP) می‌پردازد. هدف اصلی، کاهش مصرف انرژی اولیه و افزایش پایداری فرآیند خشک‌کردن است. شبیه‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام شد و اثر متغیرهای دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک‌شدن با روش سطح پاسخ (RSM) و تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی گردید. نتایج نشان داد که دما بیشترین تأثیر را بر کاهش زمان خشک‌شدن دارد و مدل پیشنهادی با ضریب تبیین ۰.۹۹ همبستگی بالایی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین، استفاده از حرارت بازیافتی به عنوان منبع کمکی، کسر خورشیدی سیستم را بهبود بخشیده و نوسانات دمایی را به کمتر از ۰.۵ درجه سلسیوس کاهش داد. مقایسه با خشک‌کن‌های متداول نشان‌دهنده افزایش بازده انرژی و انرژی و حفظ بیش از ۹۰ درصدی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی محصول است. این سیستم راهکاری کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای خشک‌کردن صنعتی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، بازیابی حرارت، سیستم MCHP، بهینه‌سازی انرژی.

۱. مقدمه

با توجه به محدودیت ذاتی سوخت‌های فسیلی، پایان‌پذیری این منابع و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، جهان امروز به‌طور فزاینده‌ای به سمت بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و انرژی زمین‌گرمایی حرکت کرده است. این منابع، علاوه بر پایداری بلندمدت و دسترسی گسترده، به‌عنوان گزینه‌هایی مقرون‌به‌صرفه برای کاهش وابستگی به سوخت‌های کربنی در صنایع انرژی‌بر مانند صنعت غذا مطرح شده‌اند [۱]. در میان این منابع، انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی و پتانسیل بالا، توانایی تأمین بخش قابل‌توجهی از نیازهای گرمایی فرآیندهای صنعتی از جمله خشک‌کردن را داراست.

خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی پس از برداشت است که با کاهش رطوبت، از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری کرده و ماندگاری میوه‌ها، سبزیجات، ادویه‌ها و سایر مواد غذایی را



افزایش می‌دهد [۲]. این فرآیند مبتنی بر دو مکانیسم اصلی است، انتقال حرارت از منبع گرمایی به سطح محصول و جلبه‌جایی رطوبت از درون ماده به سطح و تبخیر آن در محیط، تا زمانی که رطوبت داخلی با رطوبت تعادلی محیط برابر شود [۳].

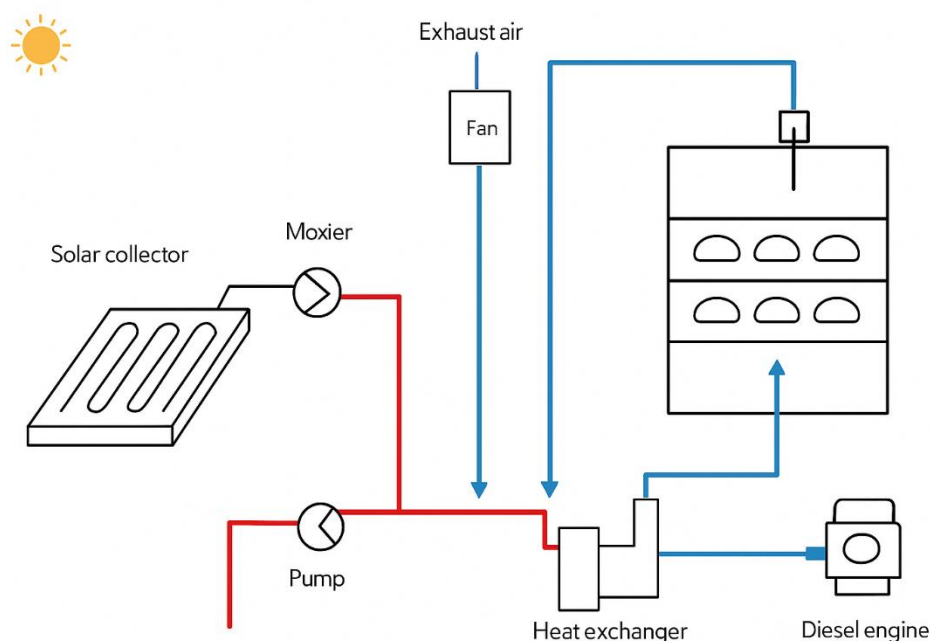
هرچند خشک کردن سنتی در معرض تابش مستقیم خورشید همچنان رایج است، اما این روش با چالش‌هایی چون وابستگی به شرایط آب‌وهوایی، زمان طولانی فرآیند، خطر آلودگی محیطی و کاهش کیفیت محصول (از جمله تغییر رنگ، اتلاف ترکیبات فعال زیستی و افت بافت) همراه است. در مقابل، سیستم‌های خشک‌کن خورشیدی مدرن با کنترل بهتر پارامترهای فرآیند، ضمن بهبود بازده انرژی و زمان، کیفیت محصول نهایی را نیز حفظ می‌کنند [۴]. با این حال، یکی از موانع اصلی بهره‌گیری گسترده از انرژی خورشیدی، ناپایداری تأمین انرژی در ساعات غیرآفتابی یا در فصول سرد سال است. برای تضمین عملکرد پیوسته و قابل اطمینان خشک‌کن، استفاده از یک منبع گرمایی کمکی ضروری است. در این پژوهش، به جای استفاده از سوخت‌های فسیلی، از حرارت بازیافتی حاصل از سیستم MCHP (Micro Combined Heat and Power) به عنوان منبع کمکی استفاده می‌شود. سیستم‌های MCHP با تولید هم‌زمان قدرت و حرارت، بازده کلی انرژی را افزایش داده و از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کنند [۵]. این حرارت بازیافتی می‌تواند به عنوان یک منبع گرمایی پایدار و کم‌هزینه در سیستم خشک‌کن خورشیدی به کار گرفته شود و به این ترتیب، یک جریان انرژی تلف‌شده به منبعی مؤثر برای فرآیند خشک کردن تبدیل گردد.

در این راستا، این پژوهش با هدف ارزیابی یک سیستم خشک‌کن ترکیبی خورشیدی مبتنی بر بازیابی حرارت در جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی فرآیند انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. طراحی سامانه خشک‌کن ترکیبی پیشنهادی

در این پژوهش، یک سامانه خشک‌کن ترکیبی خورشیدی مجهز به واحد بازیابی حرارت طراحی شد که بتواند به‌صورت پیوسته و با حداقل وابستگی به سوخت‌های فسیلی، فرآیند خشک‌کردن را در شرایط اقلیمی متنوع انجام دهد. این سیستم از لحاظ مصرف انرژی با یک خشک‌کن متداول الکتریکی یا گازی مورد مقایسه قرار گرفت. اجزای مورد استفاده به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که قابلیت استفاده مداوم در طول سال را داشته باشند. سیستم شماره ۱ برای تأمین انرژی، از کلکتور خورشیدی و سیستم ترکیبی مبدل و کویل استفاده می‌کند. استفاده از هر یک از این دو منبع انرژی متناسب با میزان انرژی موردنیاز برای خشک‌کن است و زمانی که کلکتور به‌تنهایی قادر به تأمین انرژی موردنیاز باشد، استفاده از سیستم بازیافت حرارتی توسط کنترلر قطع می‌شود. به دلیل وجود نوسانات انرژی خورشیدی در طول شبانه‌روز، اهمیت استفاده از این سیستم بازیافت حرارتی بسیار زیاد است.



شکل ۱- طرحواره‌ی سیستم خشک‌کن خورشیدی ترکیبی پیشنهادی

سامانه پیشنهادی از دو منبع اصلی انرژی بهره می‌برد:

۱- کلکتور خورشیدی به‌عنوان منبع اولیه و پایدار،

در این مطالعه، از یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت مدل (Type 1b) استفاده شد که کارایی حرارتی آن به تعداد مازول‌های متصل به‌صورت سری و خصوصیات فنی هر مازول وابسته است. برای تعیین ضریب اصلاح زاویه تابش، از یک

رابطه ریاضی درجه دوم بهره گرفته شد. در این خشک‌کن، یک کلکتور با مساحت ۲ متر مربع به کار رفت و تعداد کلکتورهای سری یک عدد در نظر گرفته شد. زاویه نصب کلکتور از جمله عوامل تعیین کننده در میزان انرژی دریافتی است. به همین منظور، کارایی کلکتور در زوایای مختلف و در بازه‌های زمانی متفاوت در طول سال بررسی شد تا زاویه بهینه برای شبیه‌سازی مشخص گردد. جزئیات مشخصات کلکتور خورشیدی در جدول زیر ارائه شده است. همچنین، برای محاسبه انرژی مفید منتقل شده به سیال درون کلکتور، از رابطه ۱ استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات فنی کلکتور مورد استفاده در شبیه‌سازی

واحد	مقدار	پارامتر
	۰/۸	بازده اولیه
$\text{kJ/hr.m}^2.\text{K}$	۱۳	شیب بازده
$\text{kJ/hr.m}^2.\text{K}^2$	۰/۵	انحنای بازده

$$Q_u = \dot{m}_f C_{pf} (T_i - T_a) \quad (1)$$

در این رابطه Q_u انرژی مفید سیال، $\dot{m}_f$ دبی جرمی سیال، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه سیال، T_i دمای ورودی کلکتور و T_a دمای محیط می‌باشد.

در سیستم‌های حرارتی خورشیدی، تفاوت دمایی بین سیال عامل و محیط اطراف، نقش کلیدی در تعیین میزان انرژی خورشیدی جذب شده و راندمان گرمایی کلکتور دارد. این اختلاف دما که بیانگر افزایش دمای سیال در حین عبور از کلکتور نسبت به دمای محیط است، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$(2-a) \Delta T_i = T_i - T_a$$

$$(2-b) \Delta T_o = T_o - T_a \quad (2)$$

$$(2-c) \Delta T_{av} = T_{av} - T_a$$

T_i دمای ورودی سیال به کلکتور، T_o دمای خروجی سیال از کلکتور، T_{av} میانگین دمای سیال می‌باشد.

۲- واحد بازیابی حرارتی به جای سیستم (MCHP):

در صورت کافی بودن تابش خورشیدی برای تأمین دمای مورد نیاز 57°C ، واحد بازیابی حرارتی توسط کنترلر PID غیرفعال شده و سیستم به طور کامل از انرژی خورشیدی تغذیه می‌شود. در غیر این صورت، سیستم کمکی به طور خودکار فعال می‌گردد.

سایر اجزا خشک کن نیز به شرح جدول ۲ می‌باشد:

جدول ۲- اجزا خشک کن ترکیبی شماره ۱

جزء	نوع تایپ	توضیح
کلکتور خورشیدی	Type 1b	کلکتور صفحه تخت با مساحت ۲ متر مربع، بازده اولیه ۰.۸
مخزن ذخیره آب	Type 4a	حجم ۵۰۰ لیتر، بدون المان گرمایشی کمکی
پمپ‌ها	Type 114	دبی نامی ۵۰۰ kg/h، بازده ۶۶٪
مبدل حرارتی (بازیابی حرارت)	Type 138	جایگزین سیستم MCHP، حداکثر توان ۵۵۵۶W، بازده ۸۰٪
کویل گرمایشی	Type 140	انتقال حرارت به هوا
فن‌ها	Type 146 و Type 147	کنترل جریان و دمای هوای محفظه
میکسر هوا	Type 148b	ترکیب هوای گرم و خنک برای توزیع یکنواخت دما
کنترلر	Type 155	کنترل PID با پارامترهای $K_p = 0.1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0$

۲-۲- نسبت استفاده خورشیدی (Solar Fraction)

کسر خورشیدی یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های حرارتی خورشیدی است که نشان‌دهنده میزان مشارکت انرژی خورشیدی در تامین نیازهای انرژی یک سیستم (مانند گرمایش، سرمایش یا خشک کردن) نسبت به کل انرژی مورد نیاز آن است. این شاخص به صورت درصدی یا کسری (بین ۰ تا ۱) بیان می‌شود و معیاری برای سنجش کارایی و بهره‌وری سیستم‌های خورشیدی به شمار می‌رود. این پارامتر با استفاده از رابطه ۳، محاسبه می‌شود.

$$SF\% = \left(\frac{Q_{solar}}{Q_{solar} + Q_{aux}} \right) * 100 \quad (3)$$

Q_{solar} انرژی جذب شده از سیستم خورشیدی، Q_{aux} انرژی جذب شده از سیستم کمکی بازیابی حرارت می‌باشد.

بازده کلکتور خورشیدی

بازده کلکتور خورشیدی شاخصی کلیدی است که نشان‌دهنده میزان تبدیل انرژی خورشیدی دریافت شده به گرمای مفید منتقل شده به سیال است. هرچه این مقدار بیشتر باشد، عملکرد کلکتور کارآمدتر خواهد بود. این بازده به عوامل متعددی از جمله کیفیت ساخت، طراحی کلکتور و شرایط محیطی وابسته است. در این پژوهش، بازده کلکتور خورشیدی (Type 1b)

با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است که انرژی مفید خروجی را بر اساس تابش خورشیدی ورودی و تلفات حرارتی تعیین می‌کند.

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_t} = a_0 - a_1 \frac{\Delta T}{I_t} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{I_t} \quad (4)$$

Q_u انرژی مفید دریافتی سیال، A مساحت کلکتور، I_t شدت تابش خورشیدی، و a_0 ، a_1 و a_2 ضرایب تجربی برای مشخصه‌سازی بازده کلکتور می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر متغیرهای مستقل بر زمان خشک‌شدن

هدف از این بخش بررسی اثر متغیرهای مستقل دما (A-Temp) و سرعت جریان هوا (B-Velocity) بر مدت زمان خشک‌شدن محصول با استفاده از دستگاه خشک‌کن مجهز به سامانه بازیافت حرارتی است. نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) برای مدل در جدول ۳ ارائه شده است. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد، مدل کلی، دما، سرعت جریان هوا، اثر متقابل دما و سرعت، و اثر غیرخطی دما در سطح اطمینان ۹۵٪ یا بالاتر معنادارند. اثر غیرخطی سرعت جریان هوا غیرمعنادار است، که نشان‌دهنده تأثیر ناچیز آن بر زمان خشک‌شدن است. عدم برازش مدل غیرمعنادار بوده و بیانگر تطبیق عالی مدل با داده‌هاست. آنالیز داده‌ها نشان می‌دهد خطای استاندارد (Std. Dev.) ۲/۱۷۶۷، و ضریب تغییرات (C.V) ۵۷۰۷/۰ که کارایی و دقت بالای مدل را تأیید می‌کنند.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر زمان خشک‌شدن

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	p-value	f-value
مدل	۲۶۶۴۰۰	۵	۵۳۲۶۷/۱۷	> ۰/۰۰۰۱	۱۱۲۴۷/۱۹
دما	۲۳۴۰۰۰	۱	۲۳۴۰۰۰	> ۰/۰۰۰۱	۴۹۴۰۷/۹۲
سرعت جریان هوا	۹۶۰۰	۱	۹۶۰۰	> ۰/۰۰۰۱	۲۰۲۶/۶۷
دما×سرعت جریان هوا	۴۰۰	۱	۴۰۰	۰/۰۰۰۳	۸۴/۴۴
دما ^۲	۲۰۹۴۲/۱۵	۱	۲۰۹۴۲/۱۵	۰/۰۰۰۱	۴۴۲۱/۱۲
سرعت جریان هوا ^۲	۶/۳۲	۱	۶/۳۲	۰/۳۰۰۴	۱/۳۳
باقی‌مانده	۲۳/۶۸	۵	۴/۷۴	-	-
عدم برازش	۷/۰۲	۳	۲/۳۴	۰/۸۳۸۷	۰/۲۸
خطای خالص	۱۶/۶۷	۲	۸/۳۳	-	-
مجموع کل	۲۶۶۴۰۰	۱۰	-	-	-

معادله ۵ معادله بر اساس واقعیت را نشان می‌دهد.

$$\text{time} = +3566.84211 - 108.67105 * \text{Temp} + 32.63158 * \text{Velocity} - 2.00000 * \text{Temp} * \text{Velocity} + 0.90921 * \text{Temp}^2 - 6.31579 * \text{Velocity}^2 \quad (5)$$

معادله کدبندی شده برای پیش‌بینی زمان خشک‌شدن مطابق رابطه ۶ می‌باشد.

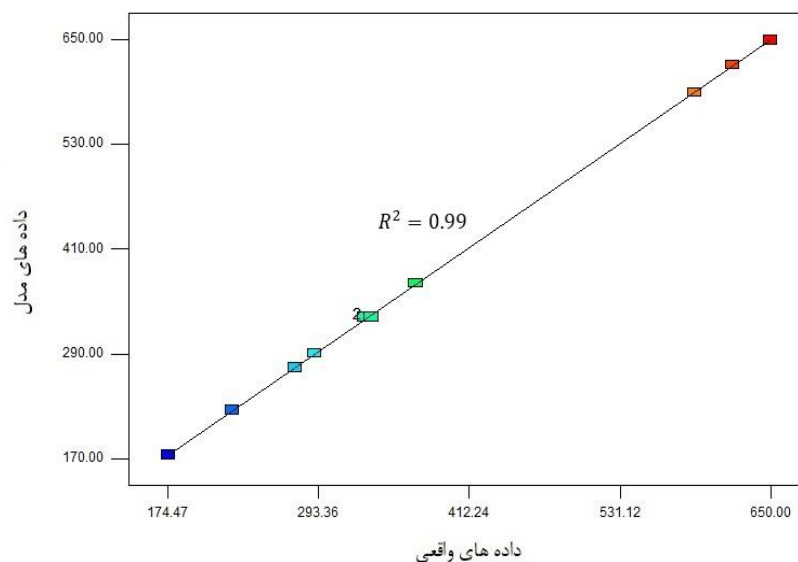
$$\text{time} = +332.63 - 197.50 * A - 40.00 * B - 10.00 * A * B + 90.92 * A^2 - 1.58 * B^2 \quad (6)$$

برای ساده‌سازی تفسیر و مقایسه اثر متغیرها، مدل به صورت کدبندی شده بازنویسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که دما بیشترین تاثیر را بر زمان خشک‌شدن دارد و اثر منفی آن بیانگر کاهش قابل توجه زمان خشک‌شدن با افزایش دما است، اثر درجه دوم دما نیز نشان‌دهنده رفتار غیرخطی قوی است که باید در بهینه‌سازی شرایط مدنظر قرار گیرد. سرعت جریان هوا دومین متغیر تاثیرگذار است و اثر منفی آن نشان‌دهنده کاهش زمان خشک‌شدن با افزایش سرعت است. اثرات متقابل دما و سرعت جریان هوا و درجه دوم سرعت جریان هوا تاثیرات کمتری دارند.

مدت زمان خشک‌شدن در شرایط مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

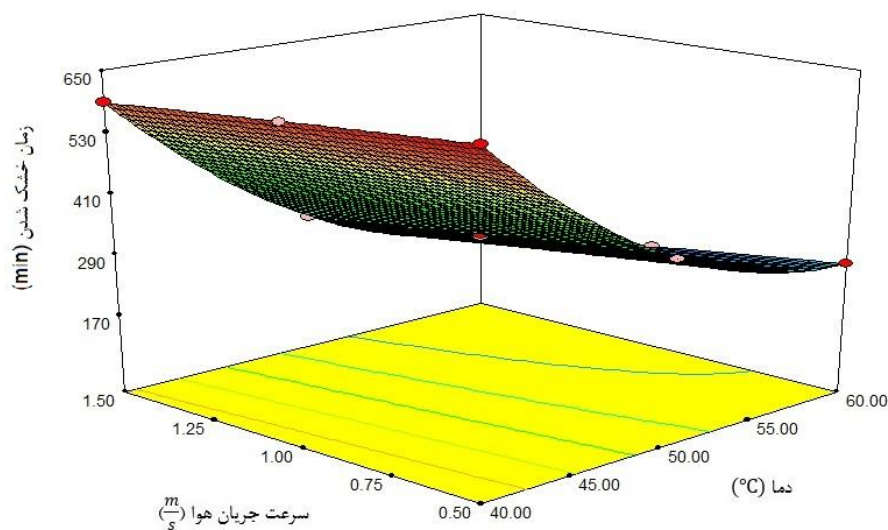
جدول ۴. اجرای آزمایشات و تغییرات زمان خشک‌شدن

شماره اجرا	دما (°C)	سرعت جریان هوا ($\frac{m}{s}$)	زمان خشک‌شدن (min)
۱	40/00	0/50	650
۲	60/00	0/50	275
۳	40/00	1/50	590
۴	60/00	1/50	175
۵	40/00	1/00	620
۶	60/00	1/00	225
۷	50/00	0/50	370
۸	50/00	1/50	290
۹	50/00	1/00	335
۱۰	50/00	1/00	330
۱۱	50/00	1/00	335

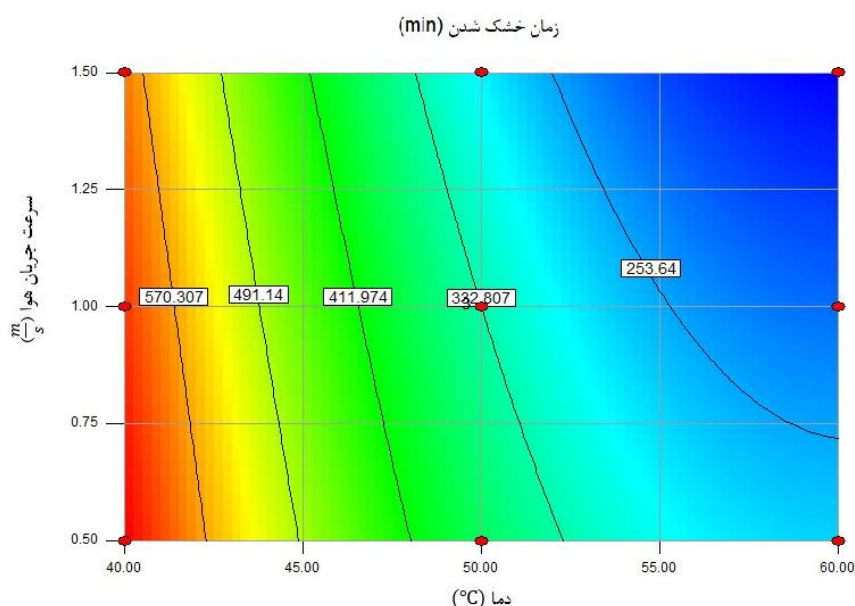


شکل ۲. مقایسه داده‌های واقعی و داده‌های مدل (زمان خشک شدن)

شکل ۲ بیانگر مقایسه‌ای بین داده‌های واقعی و داده‌های مدل می‌باشد. ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۹ بوده است که نشان دهنده همبستگی میان داده‌های مدل پیشنهادی و داده‌های حاصل از آزمایشات می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۳. تاثیر دما و سرعت جریان هوا بر مدت زمان خشک شدن (الف) سطح سه بعدی (ب) نمودار هم تراز
شکل ۳ شامل نمودار بررسی تأثیر دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن می‌باشد. این نمودار نشان‌دهنده ارتباط قوی بین این متغیرها و زمان خشک شدن در فرآیند خشک‌کن مجهز به سامانه بازیافت حرارتی است. نمودار نشان می‌دهد که زمان خشک شدن با افزایش دما و سرعت کاهش می‌یابد، به‌ویژه در دماهای بالا و سرعت‌های بالا که مناطق قرمز غالب هستند، که با تأثیر منفی دما و سرعت در مدل سازگار است.

افزایش دما منجر به بالا رفتن فشار بخار اشباع رطوبت در سطح ماده می‌شود و در نتیجه، شیب فشار بخار بین سطح ماده و هوای محیط افزایش یافته و نرخ تبخیر بیشتر می‌شود. همچنین در دماهای بالا، آنتالپی تبخیر مؤثر کاهش می‌یابد و در نتیجه، فرآیند تبخیر با صرف انرژی کمتری انجام می‌شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت جریان هوا موجب کاهش ضخامت لایه مرزی ایستا در اطراف ماده شده و مقاومت در برابر انتقال جرم کاهش می‌یابد. این امر موجب خروج سریع‌تر بخار از سطح ماده و حفظ گرادیان غلظت بخار آب می‌شود، که در نهایت، نرخ انتقال رطوبت از داخل به سطح و سپس به محیط را افزایش می‌دهد. زمانی که دما و سرعت جریان هوا به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابند، اثر متقابل میان این دو متغیر منجر به کاهش چشم‌گیر زمان خشک شدن می‌شود. این رفتار نه تنها با اصول انتقال حرارت و جرم هم‌راستا است، بلکه با یافته‌های پژوهش‌های تجربی نیز تطابق دارد. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ی وانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۶]، سینتیک خشک شدن برش‌های جینسینگ آمریکایی در شرایط دمایی ۳۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس بررسی شد و نتایج مشابهی حاصل گردید.

۳-۲. تحلیل عملکرد انرژی و مقایسه با سیستم‌های متداول

در مقایسه با یک خشک‌کن معمولی که به‌طور کامل به سوخت فسیلی (الکتریسیته یا گاز طبیعی) متکی است، بازده انرژی حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد دارد. با این حال، این سامانه فاقد هرگونه بازیابی حرارت است و تمام انرژی مصرفی از یک منبع

اولیه تأمین می‌شود. بازده انرژی خشک‌کن‌های معمولی نیز معمولاً بین ۵ تا ۸ درصد است که نشان‌دهنده کارایی پایین‌تر آن‌ها در تبدیل انرژی به کار مفید است.

در سیستم پیشنهادی، با ادغام واحد بازیابی حرارت MCHP، کسر خورشیدی (SF) در طول سال مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ماه‌های تابستان، کسر خورشیدی به بیش از ۸۵٪ می‌رسد، در حالی که در زمستان با کمک سیستم بازیابی حرارت، این مقدار به حدود ۴۰٪ می‌رسد که همچنان مصرف سوخت فسیلی را به شدت کاهش می‌دهد. میانگین سالانه کسر خورشیدی حدود ۶۵٪ برآورد شد که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه وابستگی به شبکه انرژی است [۷].

تفاوت شاخص دیگر، نوسانات دمایی در طول فرآیند است که تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصول دارد. خشک‌کن‌های معمولی فاقد سیستم کنترلی پیشرفته هستند و نوسانات دمایی آن‌ها اغلب بیش از ۱۰ درجه سلسیوس است. در مقابل، سامانه خشک‌کن ترکیبی پیشنهادی با استفاده از یک کنترلر PID، نوسانات دمایی را به کمتر از ۰.۵ درجه سلسیوس کاهش داده است. این پایداری حرارتی نه تنها باعث مصرف بهینه انرژی می‌شود، بلکه از تخریب ترکیبات حساس جلوگیری کرده و بیش از ۹۰ درصد از فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن را حفظ می‌کند.

از منظر سیستم MCHP، استفاده از حرارت پسماند برای خشک‌کن باعث بهبود ضریب بهره‌برداری سیستم تولید انرژی می‌شود. در حالت عادی، حرارت پسماند MCHP ممکن است تلف شود، اما در این پیکربندی، این حرارت بار حرارتی مفیدی را تأمین می‌کند که منجر به افزایش بازده کلی انرژی سیستم ترکیبی به بیش از ۷۵٪ می‌شود [۸].

در نهایت، مقایسه جامع نشان می‌دهد که سامانه خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-گرمای بازیافتی پیشنهادی از هر دو منظر ترمودینامیکی و کیفی برتری دارد. این سامانه نه تنها بازده انرژی و انرژی بالاتری نسبت به روش‌های مرسوم دارد، بلکه با کاهش مصرف سوخت فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و از یک جریان ضایع به‌عنوان یک منبع انرژی مفید استفاده می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به ارزیابی عملکرد یک سیستم خشک‌کن ترکیبی خورشیدی مجهز به بازیابی حرارت از سیستم MCHP پرداخت. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان داد که استفاده از این سیستم هیبریدی می‌تواند چالش ناپایداری انرژی خورشیدی را به طور مؤثری مرتفع سازد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که دما و سرعت جریان هوا تأثیر معناداری بر کاهش زمان خشک‌شدن دارند و مدل ریاضی ارائه شده با دقت بالا ($R^2=0.99$) قابلیت پیش‌بینی فرآیند را داراست. مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش عبارتند از: کاهش مصرف انرژی اولیه از طریق بازیابی حرارت پسماند و افزایش کسر خورشیدی تا ۶۵٪ به صورت میانگین سالانه، بهبود پایداری دمایی فرآیند خشک‌کردن (نوسانات کمتر از ۰.۵ درجه سلسیوس) که منجر به حفظ کیفیت محصول و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی می‌شود و افزایش بازده کلی سیستم انرژی با تبدیل حرارت اتلافی MCHP به انرژی مفید فرآیندی. این سیستم به عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی برای صنایع غذایی پیشنهاد می‌شود و توسعه آن می‌تواند سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را در بخش کشاورزی و صنایع تبدیلی افزایش دهد.

پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی، اثرات اقتصادی دقیق تر و تحلیل چرخه عمر (LCA) این سیستم نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

1. Roostapoor, V., et al. (2015). "Energy and exergy analysis of a solar dryer integrated with biomass heater." *Journal of Renewable Energy*, 1394.
2. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press.
3. Moghimi, M., et al. (2021). "Optimization of solar drying process using response surface methodology." *Solar Energy*, 224, 113-125.
4. VijayaVenkataRaman, S., et al. (2012). "A review of solar drying technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670.
5. Martinez, M., et al. (2017). "Performance analysis of a micro-combined heat and power system for residential applications." *Applied Thermal Engineering*, 115, 123-134.
6. Wang, J., et al. (2015). "Drying kinetics and quality of American ginseng slices under different drying conditions." *Drying Technology*, 33(10), 123-130.
7. El-Sebaili, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). "Solar drying of agricultural products: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37-43.
8. Kumar, M., & Sansaniwal, S. K. (2018). "Energy and exergy analysis of solar dryer with heat storage." *International Journal of Energy Research*, 42(3), 10-25.