



مقاله پژوهشی

تحلیل اکسرژی برای خشک کردن شلتوک نیم‌جوش در خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز - هوای گرم

علی کیایی^۱، ابراهیم تقی‌نژاد^{۲*}، مهدی قاسمی و رنامخواستی^۳ و مصطفی بهرامی^۱

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۹/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۱)

چکیده

تحلیل اکسرژی برای تعیین مقدار بازده و تلفات اکسرژی، با استفاده قانون دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. در این مطالعه، یک سیستم خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز - هوای گرم برای خشک‌کردن شلتوک نیم‌جوش (رقم فجر) مورد مطالعه قرار گرفت و تحلیل اکسرژی فرایند خشک‌کردن آن در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها، در سرعت هوای ورودی m/s ۰/۳۲ و $0/49 W/cm^2$ و دمای هوای ورودی 40 ، 50 و $60^\circ C$ صورت گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین بازده اکسرژی، مربوط به دمای ورودی $60^\circ C$ با مقدار متوسط 66% و کمترین تلفات اکسرژی، مربوط به دمای هوای ورودی $40^\circ C$ با میزان متوسط $1/33 KJ/s$ است. متوسط بازده اکسرژی برای شدت تابش $0/49 W/cm^2$ ، در سه دمای 40 ، 50 و $60^\circ C$ به ترتیب $8/6$ ، $1/23$ و $7/28\%$ بالاتر از متوسط بازده اکسرژی در شدت $0/32 W/cm^2$ بود. این مطالعه نشان داد که خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز - هوای گرم ترکیبی، دارای بازده اکسرژی بالا و کارآمد در خشک‌کردن شلتوک نیم‌جوش است؛ این بازده با افزایش دمای هوای ورودی و شدت تابش، افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: اکسرژی، خشک‌کن، هوای گرم، شلتوک نیم‌جوش، مادون‌قرمز

۱. مقدمه

خروج هوا به هدر می‌رود، راندمان بالاتری داشته و کیفیت محصولات خشک‌شده با این روش، در مقایسه با روش هوای گرم، بهتر است [۵]؛ بنابراین استفاده از شدت تابش فرسوخ در خشک کردن برنج نیم‌جوش‌شده، می‌تواند مزایای بسیاری نسبت به روش خشک کردن معمولی در شرایط خشک کردن مشابه، مانند دستیابی به گرمایش سریع و نسبتاً یکنواخت با توجه به نفوذ گرمای اشعه مادون قرمز و در نتیجه از بین بردن سریع رطوبت و کاهش گرادیان رطوبت در دانه برنج و بازده انرژی بالا داشته باشد.

افزایش نگرانی برای کیفیت محصول و نیاز به فرآوری و به حداقل رساندن هزینه‌های انرژی، به مطالعه‌ای مفصل‌تر و درکی درست از خشک کردن مواد غذایی منجر می‌شود [۶]. طی دهه‌های گذشته، تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی، به خصوص تجزیه و تحلیل اکسرژی، به یک ابزار ضروری برای طراحی سیستم، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی دستگاه‌های حرارتی تبدیل شده است. اکسرژی یک اندازه‌گیری از پتانسیل جریان برای ایجاد تغییر، به عنوان یک نتیجه از پایدار نبودن نسبت به محیط اطراف است [۷]. با استفاده از روش تجزیه و تحلیل اکسرژی، مقادیر و مکان نابودی اکسرژی در کل سیستم را می‌توان شناسایی کرد، درحالی‌که راه‌حلی برای بهبود بهره‌وری انرژی معرفی می‌شود [۸ و ۹]. تجزیه و تحلیل حرارتی، به خصوص روش اکسرژی اطلاعات مفیدی را در طراحی سیستم خشک‌کن فراهم می‌کند. نتایج این تحلیل‌ها عمدتاً بسته به تنظیمات خشک‌کن و محصولی که استفاده می‌شود، متفاوت است؛ بنابراین، خشک‌کن با طرح‌های متفاوت مقادیر مختلف انرژی مصرف می‌کند و تجزیه و تحلیل اکسرژی برای همان محصول بایستی صورت گیرد. البته، هدف نهایی بهبود نتایج در قالب مصرف انرژی کمتر است [۱۰].

تاکنون مطالعات فراوانی برای تحلیل اکسرژی خشک‌کن‌های مختلفی از قبیل: خشک‌کن اسپری [۱۱ و ۱۲]، خشک‌کردن بسترسیال [۱۳، ۱۴ و ۱۵]، هوای گرم [۷، ۱۶ و ۱۷]، پمپ حرارتی [۱۸]، خشک‌کردن خورشیدی [۱۹]، خشک‌کردن فریز [۲۰]، خشک‌کردن خلأ [۲۱]، خشک‌کردن ترکیبی پمپ حرارتی و مادون قرمز [۲۲] انجام

نیم‌جوش کردن فرآیندی هیدروترمالی^۱ است که قبل از عملیات تبدیل^۲، بر روی شلتوک اعمال می‌شود که شامل سه مرحله غوطه‌وری^۳، بخاردهی^۴ و خشک کردن است. استفاده از روش نیم‌جوش کردن، روشی مفید، کاربردی و مطمئن برای حل مشکل شکستگی برنج است که تأثیر بسزایی در خودکفایی برنج دارد [۱]. نیم‌جوش کردن تا رسیدن رطوبت شلتوک به حدود ۳۵٪ بر پایه تر صورت می‌گیرد [۲]. برای کاهش محتوای رطوبت به سطح ذخیره‌سازی امن، پس از برداشت (حدود ۱۳٪ بر پایه تر)، شلتوک معمولاً با استفاده از جریان همرفتی هوای گرم، خشک می‌شود. طی خشک کردن برنج با هوای گرم، رطوبت نزدیکی سطح دانه برنج که بیشتر از مرکز آن است، ایجاد یک گرادیان رطوبتی در دانه برنج را در پی خواهد شد. گرادیان رطوبت می‌تواند در نتیجه القای شکاف پس از خنک‌شدن و کاهش کیفیت و عملکرد برنج سالم، سبب تنش کششی و فشاری شود. خشک کردن از مهم‌ترین بخش فرآیند نیم‌جوش‌شدن برنج است. روش خشک کردن تأثیر زیادی بر میزان شکستگی برنج نیم‌جوش دارد. روش‌های زیادی برای خشک کردن برنج نیم‌جوش وجود دارد؛ از قبیل: خشک‌کن خورشیدی، خشک‌کن هوای گرم، خشک‌کن خلأی، خشک‌کن بخار گرم و خشک‌کن بستر سیال [۳]. در کنار روش‌های مذکور، استفاده از شدت تابش فرسوخ نیز روش مناسبی برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی، به صورت لایه‌نازک، محسوب می‌شود. در این روش، تابش فرسوخ در محصول تبدیل به حرارت شده و با بالابردن درجه حرارت محصول، بدون ایجاد تغییرات نامطلوب، سبب خروج رطوبت از محصول می‌شود. به دنبال این فرآیند، کیفیت محصول نهایی مناسب‌تر و هزینه‌های فرآیند خشک‌شدن کاهش می‌یابد [۴]. اشعه مادون قرمز با سرعت بالاتری جذب پوسته محصول شده و سبب ایجاد حرارت می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط

1. Hydrothermal
2. Milling
3. Soaking
4. Steaming

به مزایای خشک‌کن‌های مادون قرمز و امیدبخش بودن ترکیب این خشک‌کن با خشک‌کن هوای گرم، هدف این مطالعه تجزیه و تحلیل اکسرژی در دستگاه‌های خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم برای خشک کردن شلتوک نیم‌جوش است. در این مطالعه، پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل اکسرژی، جهت به دست آوردن بالاترین بازده اکسرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد و چیدمان آزمایشی

۲.۱.۱. آماده‌سازی برنج نیم‌جوش

در این پژوهش، ۵۰ kg شلتوک، رقم فجر، از مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در آمل، تهیه شد. محققان با بررسی خواص کیفی سه رقم شلتوک طارم محلی، شیروودی و فجر، تحت تیمارهای مختلف نیم‌جوش کردن، به این نتیجه نائل شدند که تیمارهای نیم‌جوش کردن، تأثیر معنی‌داری در کاهش شکستگی رقم فجر داشته است [۲۷]؛ بنابراین رقم فجر برای اجرای تحقیق انتخاب شد. میانگین طول، ضخامت و عرض دانه این رقم، به ترتیب برابر با ۱۰/۹۸، ۲/۲۴ و ۱/۹۲ mm گزارش شد [۲۸].

قبل از شروع خشک کردن، فرآیند غوطه‌وری و بخاردهی بر شلتوک اجرا شد. برای غوطه‌وری شلتوک، سامانه‌ای که در دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده بود، به کار گرفته شد. بررسی پژوهش‌ها نشان داد که دمای غوطه‌وری 65°C و زمان بخاردهی ۴ min، بهترین تیمار برای اعمال فرآیند نیم‌جوش شلتوک رقم فجر است [۱]؛ بنابراین در پژوهش حاضر، دمای غوطه‌وری 65°C و زمان بخاردهی ۴ min برای نیم‌جوش کردن انتخاب شد. جهت تکمیل فرآیند نیم‌جوش کردن، ۲ h بعد از غوطه‌وری [۲۹]، مرحله بخاردهی (در فشار اتمسفر و دمای 96°C) اجرا شد. برای تعیین میزان رطوبت شلتوک، نمونه‌های ۱۰ گرمی، به مدت ۲۴ h در اجاق آزمایشگاهی، تحت دمای 130°C قرار داده شدند [۱].

شده است. مطالعاتی هم در زمینه تحلیل اکسرژی شلتوک شامل ارزیابی عملکرد اکسرژی در فرآیند خشک کردن بستر سیال شلتوک توسط Khanali و همکاران (۲۰۱۳)، انجام گرفت. نتایج نشان داد که اندازه پارامترهای اکسرژی، به شدت به متغیرهای خشک‌کن بستگی دارد. همچنین تأیید شد که تحلیل اکسرژی ارائه شده در این مطالعه، می‌تواند برای به حداقل رساندن تلفات و خسارت‌های رخ داده در سامانه‌های خشک‌کن‌های صنعتی و افزایش پایداری، فرآیندهای خشک کردن روش بستر سیال را اعمال کرد [۱۵]. تحلیل انرژی و اکسرژی خشک‌کن بستر سیال صنعتی شلتوک توسط Sarker و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعه شد. این مطالعه نشان داد که عایق کافی روی خشک‌کن و بازگشت هوای خروجی، می‌تواند باعث افزایش بازده سامانه‌های خشک‌کن شود [۲۳]. جعفری و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه‌ای پیرامون انرژی و اکسرژی، مدل‌سازی ریاضی خشک کردن شلتوک در خشک‌کن میکروویو پیوسته نیمه‌صنعتی انجام دادند. نتایج نشان داد که بهره‌وری انرژی و بازدهی اکسرژی، هم‌زمان با افزایش ضخامت لایه‌های مختلف دانه افزایش یافت. در همان لایه‌ها با افزایش توان میکروویو، بهره‌وری انرژی و راندمان اکسرژی روند کاهشی نشان داد [۲۴]. همچنین با تحلیل دقیق اکسرژی فرآیند خشک کردن در یک خشک‌کن همرفتی بستر عمیق در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک‌کن، راندمان اکسرژی افزایش خواهد یافت [۲۵]. تحلیل انرژی و اکسرژی روند خشک کردن شلتوک در یک خشک‌کن بستر سیال عمودی توسط Pattanayak و همکاران (۲۰۱۹)، انجام شد. در این تحقیق، طی زمان خشک کردن تخریب اکسرژی کاهش و کارایی اکسرژی افزایش یافت [۲۶]. مطالعات دقیق تحلیل اکسرژی، به منظور کاهش زمان خشک کردن و انرژی مورد نیاز استفاده می‌شود. این مطالعات باید با تجزیه و تحلیل دقیق اکسرژی فرآیند خشک کردن، انجام شود. با این حال، بررسی دقیق در مطالعه تحقیقات گذشته، نشان داد که هیچ مطالعه‌ای در مورد تجزیه و تحلیل اکسرژی دستگاه‌های خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم برای خشک کردن شلتوک نیم‌جوش وجود ندارد. با توجه

۲.۱.۲. فرآیند خشک کردن

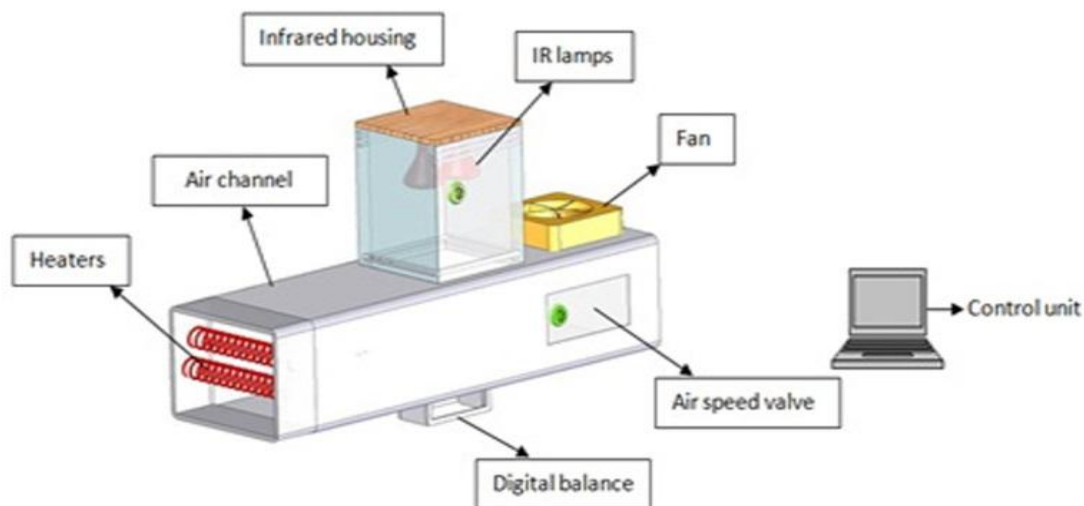
مادون قرمز را برای گل رز استفاده کرده‌اند. آنها با اندازه‌گیری شدت تابش دستگاه اندازه‌گیری تابش این خشک‌کن، پی بردند که اگر فاصله لامپ از نمونه با اندازه ۳۰، ۲۰ و ۱۰ cm باشد، آنگاه شدت تابش به ترتیب معادل ۰/۲۲، ۰/۳۲ و $0/49 W/cm^2$ خواهد بود. همچنین نمونه‌ها در فضای ۱۰ cm در بستر خشک‌کن قرار گرفت [۳۰].

ابعاد دهانه ورودی کانال خشک‌کن، $20 \times 30 cm^2$ بود. وزن نمونه (برای اندازه‌گیری جرم آب تبخیری) هر دو دقیقه یک بار طی خشک‌کردن توسط یک ترازوی دیجیتال (AND GF-600 ساخت کشور ژاپن با دقت $0/001 g$) با قابلیت اتصال به کامپیوتر ثبت شده است. سرعت هوا توسط بادسنجی با دقت $0/1 (m/s)$ و در موقعیت قبل از نمونه اندازه‌گیری شد. دمای محصول و دمای هوای خروجی نیز توسط دماسنج (Tesco) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای سطح لامپ، از ترمومتر (Lutron, Taiwan) فلزی که با سطح لامپ تماس داشت، استفاده شد. مساحت لامپ برابر مساحت سطح عرقچینی به ارتفاع h به صورت زیر محاسبه می‌شود: (عرقچین بخشی از یک کره به شعاع R است).

$$S=2\pi Rh$$

معادله (۱)

بعد از اعمال فرآیند بخاردهی، نمونه‌های شلتوک به واحد خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم منتقل شد. در هر بار آزمایش $200 g$ نمونه به صورت یکنواخت در یک سینی $20 \times 20 cm$ پهن شد و داخل محفظه خشک‌کن قرار گرفت. رطوبت اولیه شلتوک (w.b.) $1 \pm 35\%$ است. طرح‌واره خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز مورد استفاده در این پژوهش، در (شکل ۱) آورده شده است. یک دمنده برای تأمین هوای داخل محفظه خشک‌کن وجود دارد. سرعت هوای ورودی در محفظه خشک‌کردن $1 (m/s)$ توسط فن و یک دریچه تنظیم سرعت تأمین شده است. درجه حرارت هوای ورودی 40 ، 50 و $60^\circ C$ توسط دو گرم‌کن برقی تأمین می‌شود. محفظه خشک‌کردن یک مجرای مستطیل‌شکل به خوبی عایق‌بندی شد. در داخل آن، یک لامپ مادون قرمز با کنترل سطح شدت قرار گرفت. شدت تابش $0/32 W/cm^2$ و $0/49$ و ابعاد محفظه لامپ $15 \times 30 cm^2$ در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه برای خشک‌کردن در یک سینی، زیر لامپ مادون قرمز نگاه‌داشته شد. به منظور تعیین شدت تابش، فاصله بین نمونه‌ها و لامپ متغیر بود. متولی و همکاران (۲۰۱۸) نیز همین خشک‌کن ترکیبی هوای گرم -



شکل (۱) چیدمان آزمایشی خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم
Fig (1) Experimental layout of infrared hybrid dryer - warm air

۲.۲. آنالیز اکسرژی

برگشت ناپذیری نابود می‌شود. قانون دوم ترمودینامیک از یک تعادل اکسرژی برای تحلیل و طراحی دستگاه‌های حرارتی استفاده می‌شود. در حوزه تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک، اکسرژی کل خروجی و ورودی برآورد می‌شود. روش اساسی برای تحلیل اکسرژی محفظه خشک کن تعیین مقدار اکسرژی در نقاط حالت پایدار است. مقدار اکسرژی با استفاده از ویژگی‌های محیط کاری از تعادل انرژی قانون اول محاسبه می‌شود؛ بدین منظور، روابط ریاضی مورد استفاده برای انجام تعادل اکسرژی به شکل زیر بیان می‌شود [۳۱].

$$\text{Exergy} = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P_{\infty}}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty})\frac{g}{Jg_c} + \sum(\mu_c - \mu_{\infty})N_c + E_i A_i F_i (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty}T^3) + \dots$$

در اینجا پانویس ∞ برای بیان شرایط مرجع نوشته شده است. این معادله برای بیان اکسرژی بسیاری از سامانه‌ها به کار می‌رود. این معادله شامل در دسترس بودن هر منبع انرژی، مانند جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی و جریان نفوذی مواد است که توسط ترم اکسرژی مرتبط تعریف شده است. تعویض آنتالپی برای جمع انرژی داخلی و شرایط PV برای ساده سازی استفاده می‌شود. نادیده گرفتن گرانش و تکانه حرکت را می‌توان برای ساده تر کردن معادله اعمال کرد. علاوه بر این، تغییرات فشار در سیستم نیز نادیده گرفته می‌شود. اکسرژی ورودی به محفظه خشک کردن به شرح زیر بیان می‌شود [۳۲، ۲۲].

رابطه زیر محاسبه شده است [۳۳، ۱۶].

$$\bar{C}_{pai} = 1.004 + 1.88w_{ai} \quad \text{معادله (۷)}$$

$$\bar{C}_{pao} = 1.004 + 1.88w_{ao} \quad \text{معادله (۸)}$$

که در آن w_{ao} نسبت رطوبت هوای خروجی است که توسط روابط معادلات مرتبط با مراجع [۲۷، ۲۱] محاسبه شد.

$$w_{ao} = w_{ai} + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad \text{معادله (۹)}$$

که در آن \dot{m}_v نرخ انتقال جرم رطوبت ($kg \text{ water}/s$) است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m}_v = -\frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

$$\dot{m}_a = \rho_a V_a A_{DC} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

که در آن ρ_a چگالی هوا برابر ($1.22 kg/m^3$) است، V_a سرعت هوا (m/s) است و A_{DC} مساحت سطح محفظه خشک کن (m^2) است.

استفاده از معادلات مقدار اکسرژی را می‌توان بسته به دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کردن تعیین کرد. از این رو، اکسرژی تلف شده را می‌توان چنین نشان داد [۳۱، ۲۲]:

$$\text{Exergy loss} = \text{Exergy inflow} - \text{Exergy outflow}$$

$$\sum \dot{E}x_i = \sum \dot{E}x_i - \sum \dot{E}x_o \quad \text{معادله (۱۲)}$$

در این مطالعه، تحلیل اکسرژی برای تعیین بازده اکسرژی و تلفات اکسرژی انجام شد. قانون دوم ترمودینامیک مفهومی مفیدی از اکسرژی در تحلیل دستگاه‌های حرارتی معرفی می‌کند. تجزیه و تحلیل اکسرژی، انرژی موجود در نقاط مختلف در یک سیستم را ارزیابی می‌کند. اکسرژی اندازه گیری کیفیت و یا درجه انرژی است و می‌تواند در دستگاه‌های حرارتی نابود شود. قانون دوم بیان می‌کند که بخشی از اکسرژی ورودی به سیستم گرمایی با استفاده از سوخت، برق، و یا منابع دیگر در داخل سیستم با توجه به معادله (۲)

در اینجا پانویس ∞ برای بیان شرایط مرجع نوشته شده است. این معادله برای بیان اکسرژی بسیاری از سامانه‌ها به کار می‌رود. این معادله شامل در دسترس بودن هر منبع انرژی، مانند جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی و جریان نفوذی مواد است که توسط ترم اکسرژی مرتبط تعریف شده است. تعویض آنتالپی برای جمع انرژی داخلی و شرایط PV برای ساده سازی استفاده می‌شود. نادیده گرفتن گرانش و تکانه حرکت را می‌توان برای ساده تر کردن معادله اعمال کرد. علاوه بر این، تغییرات فشار در سیستم نیز نادیده گرفته می‌شود. اکسرژی ورودی به محفظه خشک کردن به شرح زیر بیان می‌شود [۳۲، ۲۲].

$$e_{ia} = [h_{ia}(T_{ia}) - h_{aai}(T_{aai}) - h_{aai}(s_{ia}(T_{ia}) - (s_{aai}(T_{aai})))] \quad \text{معادله (۳)}$$

شرایط اکسرژی در معادله را می‌توان به صورت زیر تفکیک کرد.

$$h_{ia}(T_{ia}) - h_{aai}(T_{aai}) = \bar{C}_p(T_{ia} - T_{aai}) \quad \text{معادله (۴)}$$

$$s_{ia}(T_{ia}) - s_{aai}(T_{aai}) = \bar{C}_p \ln \frac{T_{ia}}{T_{aai}} \quad \text{معادله (۵)}$$

با قراردادن معادلات ۳ و ۴ در معادله ۲، معادله زیر به دست می‌آید:

$$e_{ia} = \bar{C}_{pai}(T_{ia} - T_{aai}) - T_{aai} \ln \left(\frac{T_{ia}}{T_{aai}} \right) \quad \text{معادله (۶)}$$

توصیف می‌کند [۳۷].

$$\beta = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{IR}} \right)^4 \varepsilon_{IR}^{-1} - \frac{4}{3} \varepsilon_{IR}^{-0.25} \left(\frac{T_0}{T_{IR}} \right) \quad (۱۸)$$

انرژی جذب‌شده توسط محصول مرطوب را می‌توان با استفاده از معادله تعادل انرژی برای حجم کنترل محصول به دست آورد. بخشی از انرژی دریافت‌شده از طریق لامپ مادون قرمز منعکس شده و توسط سطح محصول، به سمت دیگر منتشر شده است؛ بخش دیگری از انرژی، از مواد منتقل می‌شود.

$$\dot{Q}_{abs} = IR_{rad} - IR_{ref} - IR_{emit} - IR_{tran} \quad (۱۹)$$

شکل (۲) نمایی از انتقال حرارت از گرم‌کن مادون قرمز به محصولات را نشان می‌دهد که بر اثر تابش مستقیم مادون قرمز و بازتاب از دیواره‌های خشک‌کن نمایان است. انتقال حرارت تشعشع بین سطوح، به جهت گیری نسبت به یکدیگر و همچنین خواص تابش و درجه حرارت آن‌ها بستگی دارد. به حساب برای اثر جهت‌گیری در انتقال حرارت تشعشع بین دو سطح عامل نمایش معرفی شده است [۳۶]. در این مورد، عامل نمایش بین دو سطح و گرم‌کن IR و محصول همچنین گرم‌کن IR و دیواره مخزن و دیواره مخزن و محصول، از روابطی که در شکل (۲) آمده است استفاده می‌شود:

همچنین معادله اکسرژی خروجی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۲]:

$$e_{oa} = [h_{oa}(T_{oa}) - h_v(T_{aai}) - T_{aai}(s_{oa}(T_{oa}) - (s_v(T_{aai})))] \quad (۱۳)$$

$$e_{oa} = \bar{C}_{pao} (T_{oa} - T_{aai}) - T_{aai} \ln \left(\frac{T_{oa}}{T_{aai}} \right) \quad (۱۴)$$

با استفاده از معادلات، مقدار اکسرژی تلف‌شده را می‌توان به دست آورد. نسبت اکسرژی تولیدی به جریان ورودی اکسرژی برای اتاق خشک‌کن، باید با توجه به تعریف راندمان اکسرژی محاسبه شود؛ بنابراین، شکل کلی راندمان اکسرژی به صورت زیر است [۲۲]:

$$\eta_{ex} = \frac{e_{oa}}{e_{ia}} \quad (۱۵)$$

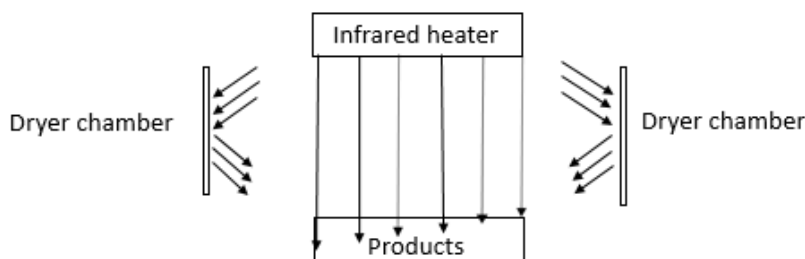
باین‌حال، بازده اکسرژی برای خشک‌کن‌های شامل مادون قرمز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸].

$$\eta_{ex} = \frac{e_{oa}}{e_{ia} + e_{abs}} \quad (۱۶)$$

با توجه به تعریف فوق، اکسرژی جذب‌شده می‌تواند به عنوان ضریبی از انرژی جذب‌شده توسط فاکتور کیفیت نوشته شود:

$$e_{abs} = \beta \times \dot{Q}_{abs} \quad (۱۷)$$

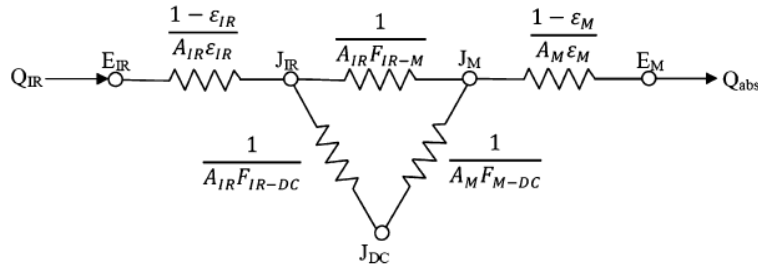
فاکتور کیفیت به عنوان نسبت مقدار اکسرژی به مقدار انرژی است. این فاکتور، یک همبستگی برای به دست آوردن نتایج قابل اطمینان است. آغاشلو (۲۰۱۶)، فاکتور کیفیت را چنین



شکل (۲) نمای انتقال حرارت تشعشع بین گرم‌کن مادون قرمز و محصول در مخزن خشک‌کن
Fig (2) View of the radiation heat transfer between the infrared heater and the product in the dryer tank

خشک‌کن و محصول مرطوب (شکل ۳) و استفاده از جریان گرمایی به این شبکه، انرژی جذب شده را می‌توان به صورت معادله ۱۹ نوشت [۲۲، ۳۷].

انرژی جذب‌شده توسط محصول، بخشی از انرژی است که توسط مادون قرمز ایجاد شده است. با نوشتن مقاومت حرارتی معادل یک از سه سطح گرم‌کن مادون قرمز، دیوار محفظه



شکل (۳) نمایش شماتیک از شبکه تابش برای محوطه سه سطحی [۳۷]

Fig (3) Schematic representation of the radiation grid for a three-level enclosure [37]

معادله (۲۰)

$$\dot{Q}_{abs} = \frac{\sigma(\bar{T}_{IR}^4 - \bar{T}_M^4)}{\frac{1 - \epsilon_{IR}}{A_{IR} \epsilon_{IR}} + \frac{1}{\frac{A_{IR} F_{IR-M}}{((A_{IR} F_{IR-DC}) + (\frac{1}{A_M F_{M-DC}}))}} + \frac{1 - \epsilon_M}{A_M \epsilon_M}}$$

در اینجا

$$\sigma = 5.67036713 \times 10^{(-8)} (W/m^2 K^4)$$

$$[37] \epsilon_{IR} = 0.9,$$

و

انتقال حرارت تشعشع بین سطوح، بستگی به جهت گیری انتقال حرارت تشعشع بین دو سطح ضریب دید معرفی شده سطوح نسبت به یکدیگر و همچنین خواص تابش و درجه حرارت آن‌ها دارد. برای به حساب آوردن اثر جهت گیری در تابش مادون قرمز و محصول به صورت زیر تعیین شد [۳۹].

جدول (۱) بیان تحلیلی برای ضریب دید بین یک المان و سطح موازی با آن [۳۹]

Table (1) Analytical expression for the coefficient of vision between an element and a plane parallel [39]

Geometric arrangement	Analytical expression for the observation factor
	$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1-X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1-Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right]$ $X = \frac{L_1}{D} \quad \text{and} \quad Y = \frac{L_2}{D}$

$$\sum_{j=1}^3 F_{1j} = F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3}$$

معادله (۲۲)

$$= F_{IR-IR} + F_{IR-DC} + F_{IR-M} = 1$$

جهت محاسبه F_{M-DC} ، همانند بالا عمل می‌شود:

$$F_{IR-M} A_{IR} = F_{M-IR} A_M$$

$$F_{M-DC} = 1 - F_{M-IR}$$

در صورتی که $A_2 = A_M$ و $dA_1 = 0.25 A_{IR}$ آنگاه [۲۸]

$$F_{IR-M} = 4F_{dA_1-A_2}$$

معادله (۲۱)

و همچنین F_{IR-DC} از رابطه زیر با توجه به $F_{IR-IR} = 0$ به دست می‌آید.

روابط مربوط به محاسبه بازده اکسرژی و اکسرژی تلف شده در نرم‌افزار متلب جهت انجام محاسبات کنوئوسی شدند. ثابت‌های مورد استفاده در این روابط، در جدول زیر آمده است:

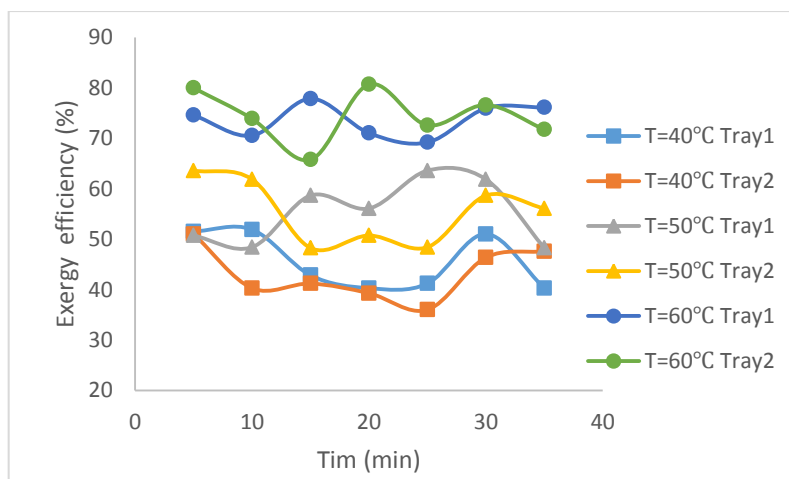
جدول (۲) ثابت‌های به کار رفته در محاسبه اکسرژی
Table (2) Constants used in the exergy calculation

Constants	Quantity
σ	$5.67036713 \times 10^{(-8)} (W/m^2 K^4)$
ε_{IR}	0.9
ε_M	[۲۶] 0.7
ρ_a	$1.22 (kg/m^3)$
$T_0 = T_{aai}$	$273.15 + 25^\circ K$

۳. نتایج و بحث

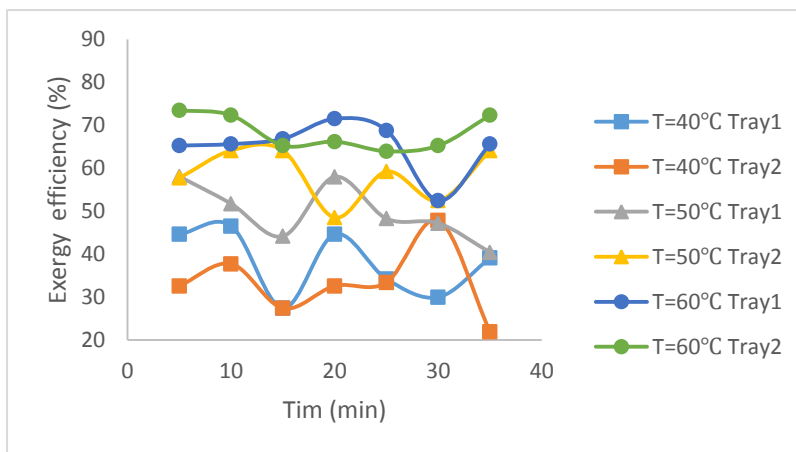
رطوبت نمونه‌های شلتوک معادل ۱۱٪ (w.b.) به دست آمد. در هر کدام از دماهای ذکر شده آزمایش فرآیند خشک کردن در دو تکرار انجام شد که در شکل‌ها مشخص هستند. در این روش خشک کردن، در هر سه دما، راندمان اکسرژی در طول فرآیند خشک کردن شلتوک برنج تقریباً دارای تغییرات نوسانی است؛ هر چند که در تحقیقی توسط آغباشلو (۲۰۱۶)، در مورد بازده اکسرژی یک خشک‌کن مادون قرمز-همرفت که به صورت تحلیلی انجام گرفت [۲۹]. تغییرات بازده به صورت خطی در نظر گرفته شد در حالی که در تحقیق حاضر، نتایج تحلیل حاصل از داده‌های آزمایشگاهی است. بیشتر تغییرات بازده اکسرژی در طول فرآیند، در اثر تغییرات نامنظم دمای خروجی است.

تجزیه و تحلیل مربوط به بازده اکسرژی و اکسرژی تلف شده فرآیند خشک کردن شلتوک برنج رقم فجر در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم با استفاده از داده‌های آزمایش انجام شد و نتایج به دست آمده از این محاسبات در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده و مورد بحث قرار گرفتند. شکل (۴) و (۵) اثر دمای هوای ورودی بر بازده اکسرژی در شدت‌های انتشار مادون قرمز ۰/۳۲ و ۰/۴۹ W/cm^2 را به ترتیب نشان می‌دهد. فرآیندهای خشک کردن ترکیب مادون قرمز - هوای گرم در سرعت ورودی ۱ (m/s) و درجه حرارت حالت مرده و محیط $25^\circ C$ ، توده محصول ۲۰۰ g و ورودی درجه حرارت هوا ۴۰، ۵۰ و $60^\circ C$ است. میزان



شکل (۴) تغییرات بازده اکسرژی در طول خشک شدن در هر سه دما و دو تکرار در شدت تابش مادون قرمز $0.49 W/cm^2$

Fig(4) Exergy efficiency changes during drying at all three temperatures and two replications at infrared radiation intensity $0.49 W/cm^2$



شکل (۵) تغییرات بازده اکسرژی در طول خشک شدن در هر سه دما و دو تکرار در شدت تابش مادون قرمز 0.32 W/cm^2 .

Fig(5) Exergy efficiency changes during drying at all three temperatures and two replications at infrared radiation intensity $0.32 \text{ (W/cm}^2)$

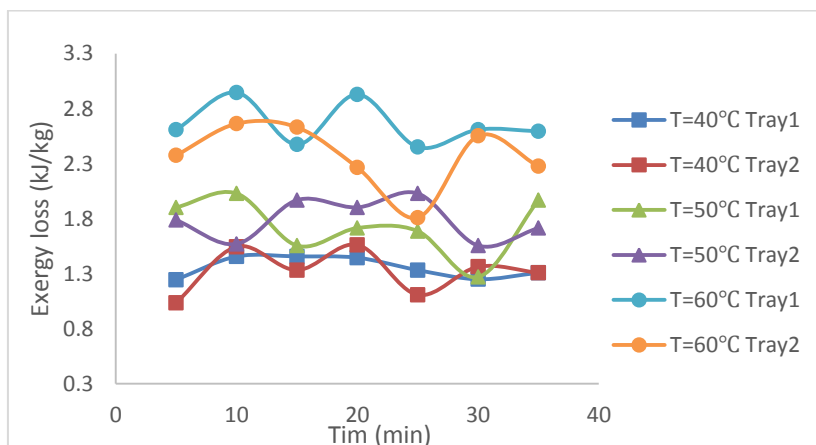
[۲۴]؛ خشک کردن بستر سیال صنعتی شلتوک توسط سارکر و همکاران (۲۰۱۵)، با بازده اکسرژی ۴۶ تا ۵۸٪ [۲۳]؛ خشک کردن شلتوک در یک خشک کن بستر سیال عمودی توسط پاتانایاک و همکاران (۲۰۱۹)، با بازده ۱۲ تا ۸۶٪ [۲۶].

بدیهی است، با افزایش شدت تابش مادون قرمز، انرژی بیشتری به محصولات جهت خشک شدن تحویل داده می شود و بر این اساس، به انتقال حرارت و جرم بالاتر منجر شده است. به عبارت بهتر، افزایش درجه حرارت منبع مادون قرمز به سرعت در حال افزایش دمای سطح مواد، منجر به افزایش فشار بخار آب و انتشار رطوبت در داخل مواد و سطح آن، به نوبه خود موجب افزایش میزان سرمایه گذاری اکسرژی برای تبخیر رطوبت و در نتیجه افزایش راندمان اکسرژی فرآیند خشک کردن می شود [۳۷].

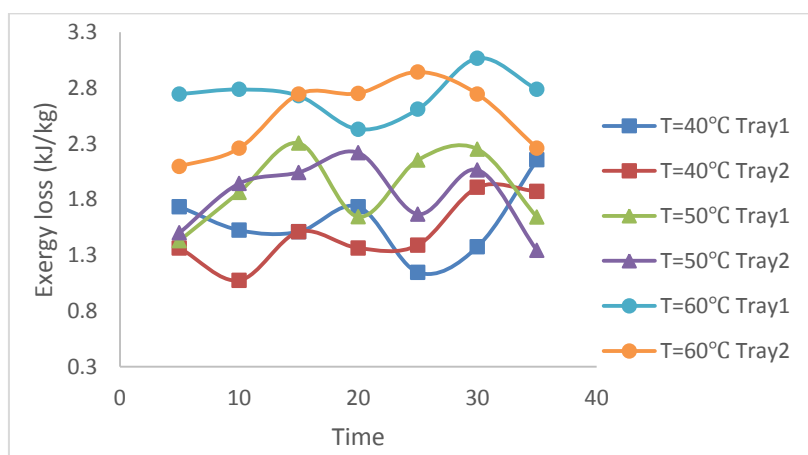
شکل (۶) و (۷) اثر دمای هوای ورودی بر اکسرژی تلف شده در شدت های انتشار مادون قرمز 0.32 W/cm^2 و 0.49 W/cm^2 را به ترتیب نشان می دهد. همان طور که در شکل ها دیده می شود، کمترین تلفات اکسرژی مربوط به دمای ورودی 40°C ثبت شده است که دارای مقدار متوسط $1/32$ و $1/35$ در شدت انتشار 0.49 W/cm^2 و متوسط $1/59 \text{ W/cm}^2$ و در شدت انتشار 0.32 W/cm^2 بود. در مطالعات آکتاس و همکاران (۲۰۱۷)، بر خشک کن ترکیبی پمپ

حداکثر بازده اکسرژی در هر دو حالت، شدت تابش مادون قرمز مربوط به دمای 60°C بود. متوسط بازده اکسرژی در طول فرآیند خشک شدن در شدت 0.49 W/cm^2 برای این دما برابر ۷۳ و ۷۴٪ برای دو تکرار بود که بالاتر از متوسط بازده اکسرژی در طول فرآیند خشک شدن در شدت 0.32 W/cm^2 یعنی ۶۵ و ۶۸٪ بود. متوسط بازده اکسرژی دو تکرار برای شدت 0.49 W/cm^2 در سه دمای 40°C ، 50°C و 60°C ، به ترتیب $1/23$ ، $1/28$ و $1/28$ بالاتر از متوسط بازده اکسرژی در شدت 0.32 W/cm^2 بود. همان طور که در شکل مشاهده می شود، در دماهای ورودی بالاتر میزان بازده اکسرژی افزایش می یابد؛ این روند در مطالعه ای که توسط خانعلی و همکاران (۲۰۱۳) نیز با یک خشک کن بستر سیال بر روی شلتوک برنج انجام شد، مشاهده شد [۱۵]. در مطالعه ای که توسط قاسمخانی و همکاران (۲۰۱۶)، افزایش دمای هوای ورودی بازده اکسرژی افزایش یافت [۴۰]. میزان بازده اکسرژی در مطالعاتی که بر خشک کردن شلتوک انجام شده است، شامل: خشک کن بستر سیال با بازده اکسرژی ۴-۱۲٪ توسط خانعلی و همکاران (۲۰۱۳) [۱۵]؛ خشک کن بستر عمیق با بازده اکسرژی ۴-۲۹٪ توسط بیگی و همکاران (۲۰۱۷) [۲۵]؛ خشک کردن شلتوک در خشک کن مایکروویو پیوسته نیمه صنعتی دارای بازده اکسرژی ۴-۱۳٪ توسط جعفری و همکاران (۲۰۱۷)

حرارتی هوای گرم، مشاهده شد که کمترین تلفات اکسرژی در کمترین سرعت هوای ورودی است [۲۲]. در این تحلیل، با افزایش دمای هوای ورودی اکسرژی تلف شده افزایش می‌یابد.



شکل (۶) تغییرات اکسرژی تلف شده در طول خشک شدن در هر سه دما و دو تکرار در شدت تابش مادون قرمز 0.49 W/cm^2 .
Fig (6) Exergy changes lost during drying at all three temperatures and two replications at infrared intensity 0.49 W/cm^2



شکل (۷) تغییرات اکسرژی تلف شده در طول خشک شدن در هر سه دما و دو تکرار در شدت تابش مادون قرمز 0.32 W/cm^2 .
Fig(7) Exergy changes lost during drying at all three temperatures and two replications at infrared intensity 0.32 W/cm^2

غیرخطی نوسان می‌کند که خود ناشی از تغییرات دمای خروجی خشک‌کن است.
 ۲. تغییر بازده خشک‌کن هیبریدی مادون قرمز - هوای گرم با تغییرات دمای ورودی زیاد است.
 ۳. با افزایش دمای هوای گرم ورودی بازده خشک‌کن و تلفات بازده هر دو افزایش می‌یابد.
 ۴. افزایش شدت تابش مادون قرمز سبب افزایش بازده خشک‌کن می‌شود در حالی که تلفات بازده افزایش نمی‌یابد.
 استفاده از این روش در خشک کردن شلتوک نیم جوش

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحلیل ترمودینامیکی خشک کردن شلتوک برنج در یک سیستم خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم مورد مطالعه قرار گرفت و تحلیل اکسرژی فرایند خشک کردن در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. تأثیر تغییرات شدت تابش و دمای هوای ورودی بر اکسرژی را می‌توان با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل‌ها و آزمایش‌ها به شرح ذیل عنوان کرد:
 ۱. بازده اکسرژی در طول فرآیند خشک کردن به صورت

موفقیت آمیز و دارای بازده اکسرژی بالایی بود و به نظر می‌رسد در خشک کردن سایر محصولات هم موفقیت آمیز باشد.

منابع

- [1] Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. & Latifi, A. (2015). Effect of soaking temperature and steaming time on the quality of parboiled Iranian paddy rice. *Int. J. Food Eng.*, 11(4), 547-556.
- [2] Manful, J. T., Grimm, C. C., Gayin, J. & Coker, R. D. (2008). Effect of variable parboiling on crystallinity of rice samples. *Cereal Chem.*, 85(1), 92-95.
- [3] Swasdisevi, T., Sriariyakula, W., Tia, W. & Soponronnarit, S. (2010). Effect of pre-steaming on production of partially-parboiled rice using hot-air fluidization technique. *J. Food Eng.*, 96(3), 455-462.
- [4] Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. & Ali, D. (2011). *Fundamentals and Theory of Infrared Radiation*. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing. New York: CRC press.
- [5] Ratti, C. & Mujumdar, A. S. (1995). *Infrared Drying*. in, Mujumdar. Handbook of industrial drying (Vol. 1). New York.
- [6] Kiranoudis, C. T. & Markatos, N. C. (2000). Pareto design of conveyor belt dryers. *J. Food Eng.*, 46, 145-155.
- [7] Dincer, I. & Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47(4), 645-652.
- [8] Kuzgunkaya, E.H. & Hepbasli, A. (2007). Exergetic performance assessment of a ground-source heat pump drying system. *Int. J. Energy Res.*, 31, 760-777.
- [9] Erbay, Z. & Icier, F. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *J. Food Eng.*, 91(4), 533-541.
- [10] Amjad, W., Hensel, O., Munir, A., Esper, A. & Sturm, B. (2016). Thermodynamic analysis of drying process in a diagonal-batch dryer developed for batch uniformity using potato slices. *J. Food Eng.*, 169, 238-249.
- [11] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S. & Madadlou, A. (2012). Optimization of emulsification procedure for mutual maximizing the encapsulation and exergy efficiencies of fish oil microencapsulation. *Powder Technol.*, 225, 107-117.
- [12] Erbay, Z. & Koca, N. (2012). Investigating the effects of operating conditions on the exergetic performance of a pilot scale spray-drying system. *Int. J. Exergy*, 11(3), 302-321.
- [13] Ozahi, E. & Demir, H. (2013). A model for the thermodynamic analysis in a batch type fluidized bed dryer. *Energy*, 59, 617-624.
- [14] Ranjbaran, M. & Zare, D. (2013). Simulation of energetic-and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*, 59, 484-493.
- [15] Khanali, M., Aghbashlo, M., Rafiee, S. & Jafari, A. (2013). Exergetic performance assessment of plug flow fluidised bed drying process of rough rice. *Int. J. Exergy*, 13(3), 387-408.
- [16] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H. & Arabhosseini, A. (2009). Performance analysis of drying of carrot slices in a semi industrial continuous band dryer. *J. Food Eng.*, 91(1), 99-108.
- [17] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H. & Arabhosseini, A. (2008). Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Drying Technol.*, 26(12), 1501-1508.
- [18] Erbay, Z. & Hepbasli, A. (2013). Advanced exergy analysis of a heat pump drying system used in food drying. *Drying Technol.*, 31(7), 802-810.
- [19] Akbulut, A. & Durmus, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*, 35(4), 1754-1763.
- [20] Liapis, A. I. & Bruttini, R. (2008). Exergy analysis of freeze drying of pharmaceuticals in vials on trays. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51(15), 3854-3868.
- [21] Dikmen, E., Yakut, A.K. & Sahin, A.S. (2012). Energy and exergy analyses of vacuum drying process of pine timbers. *Int. J. Exergy*, 11(2), 137-151.
- [22] Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A. & Şevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Convers. Manage.*, 132, 327-338.
- [23] Sarker, M. S. H., Ibrahim, M. N., Aziz, N. A. & Punan, M. S. (2015). Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy. *Energy*, 84, 131-138.
- [24] Jafari, H., Kalantari, D. & Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study. *Energy*, 138, 1016-1029.

- [25] Beigi, M., Tohidi, M. & Torki-Harchegani, M. (2017). Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer. *Energy*, 140, 374-382.
- [26] Pattanayak, B., Mohapatra, S. S. & Das, H. C. (2019). Energy and exergy analyses of paddy drying process in a vertical fluidised bed dryer. *Int. J. Exergy*, 28(2), 113-125.
- [27] Latifi, A., & Alizadeh, M. R. (2014). Effect of parboiling on qualities and milling of Iranian rice. *J. Agric. Eng. Research*, 15(2), 77-88.
- [28] Omid, M., Yadollahinia, A. R. & Rafiee, S. (2010). Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosyst. Eng. Ir.*, 41, 153-160. [In Persian]
- [29] Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A. & Taechapairoj, C. (2006). Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *J. Food Eng.*, 75(3), 423-432.
- [30] Motevali, A., Jafari, H. and Hashemi, S.J., (2018). Effect of IR intensity and air temperature on exergy and energy at hybrid infrared-hot air dryer. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 24(1), pp.31-42.
- [31] Prommas, R., Rattanadecho, P. & Cholaseuk, D. (2010). Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 37(4), 372-378.
- [32] Midilli, A. & Kucuk, H. (2003). Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*, 28(6), 539-556.
- [33] Nazghelichi, T., Aghbashlo, M. & Kianmehr, M. H. (2011). Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Comput. Electron. Agric.*, 75(1), 84-91.
- [34] Akpınar, E.K. (2004). Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in convective type dryer. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31 (8), 1165–1176.
- [35] Akpınar, E. K., Midilli, A. & Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *J. Food Eng.*, 72(4), 320-331.
- [36] Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P. & Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *J. Food Eng.*, 92(1), 100-106.
- [37] Aghbashlo, M. (2016). Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. *Heat Mass Transfer.*, 52, 829 –844.
- [38] Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. & Soponronnarit, S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *J. Food Eng.*, 78 (4), 1248-1258.
- [39] Ozisik, M. N . (1985). *Heat Transfer A Basic Approach*, McGraw-Hill , New York, 632 P.
- [40] Ghasemkhani, H., Keyhani, A., Aghbashlo, M., Rafiee, S., & Mujumdar, A. S. (2016). Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.*, 94, 13-23.

Research Article
**Exergy Analysis for Parboiled Paddy Drying in Infrared - Hot Air
Combined Dryer**

**Ali kiapey¹, Ebrahim Taghinezhad^{2*}, Mahdi Ghasemi Varnamkhasti³, Mostafa
Bahrami¹**

- 1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.**
- 2. Department of Agricultural Technology Engineering, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.**
- 3. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.**

Abstract

Exergy analysis is performed to determine the exergy yields and losses using the second law of thermodynamics. In this study, an infrared-hot air combined dryer system was studied for drying of parboiled paddy (Fajr variety) and the exergy analysis of its drying process was investigated in laboratory scale. Experiments were performed at 1 m/s inlet speed 0.32 and 0.49 W/cm^2 infrared radiation as well as three inlet air temperatures of 40, 50 and 60 ° C. The results showed that the highest exergy efficiency was at 60 ° C with an average value of 66% and the lowest exergy loss was at temperature of 40 ° C with an average of 1.33 kJ/s. The average exergy efficiency for 0.49 W/cm^2 at three temperatures of 40, 50, 60 ° C was 8.6, 1.23 and 7.28% higher than the average exergy efficiency at 0.32 W/cm^2 , respectively. This study shows a successful and efficient combination of infrared and hot air in parboiled paddy drying. This study shows a high exergy efficiency and efficient combination of infrared and hot air in parboiled paddy drying which increases the efficiency by increasing the inlet hot air and infrared radiation.

Keywords: Exergy; Dryin; Hot Air; Parboiled Paddy; Infrared

* Corresponding author: e.taghinezhad@uma.ac.ir

فهرست علائم
Symptom List

$A(m^2)$	Cross-sectional area
$A_{DC}(m^2)$	Cross-sectional area of the dryer compartment
$A_i(m^2)$	Inlet cross section
$A_{IR}(m^2)$	Infrared radiation area
$A_M(m^2)$	Cross section of material (product)
$C_{p,air}(kJ/kg K)$	Special heat capacity of air
$\bar{C}_{pai}(kJ/kg K)$	Average heat capacity for the inlet air
$\bar{C}_{pao}(kJ/kg K)$	Average heat capacity for the outlet air
$\bar{C}_p(kJ/kg K)$	Average Special Heat Capacity
e_{ia}	Exergy for Inlet Air
e_{oa}	Exergy for Exhaust Air
E_i	Inlet emissive power
$Ex_i(kJ)$	Exergy Input
$Ex_l(kJ)$	Exergy loss
F_i	Inlet shape factor
F_{IR-DC}	Infrared Visibility Factor - Drying chamber
F_{IR-M}	Infrared-Material Visibility Factor
F_{M-DC}	Drying chamber viscosity – materials
$g(m/s^2)$	Acceleration of gravity
g_c	Newton's law constant
$h_{ia}(kJ/kg)$	Entrance enthalpy air
$h_{aai}(kJ/kg)$	Entrance enthalpy of ambient air
IR_{rad}	Infrared radiation
IR_{ref}	Infrared reflected
IR_{emit}	Infrared emitted
IR_{tran}	Infrared transmitted
J	Jules Constant
N_c	Chemical number of species
$\dot{m}_a(kg\ air/s)$	Air mass transfer rate
$\dot{m}_v(kg\ water/s)$	Moisture Mass Transfer Rate
$p_e(kPa)$	Environmental pressure
$Q_{abs}(kJ/s)$	Energy absorbed

$s(kJ/kg\ k)$	Entropy
$s_x(kJ/kg\ k)$	Entropy for ambient
$s_{ia}(kJ/kg\ k)$	Entropy air inlet
$s_{aai}(kJ/kg\ k)$	Entropy for ambient air inlet
$(K) T$	Temperature
$T_{ia}(K)$	Inlet Air Temperature
$T_{aai}(K)$	Ambient Inlet Air Temperature
$T_{IR}(K)$	Infrared source temperature
$T_M(k)$	Product temperature
$T_0(k)$	Dead state temperature
$T_x(k)$	ambient temperature
$u(kJ/kg)$	Internal energy
$u_x(kJ/kg)$	Internal energy for the environment
$v(m^3/kg)$	Special volume
$v_x(m^3/kg)$	Special volume of environment
$V(m/s)$	Velocity
$V_a(m/s)$	Air velocity
$w(kg/kg)$	Specific humidity
$w_{ai}(kg\ water/kg\ drying\ air)$	Inlet air humidity ratio
$w_{ao}(kg\ water/kg\ drying\ air)$	Outlet air humidity ratio
$W_t(kg)$	Weight of product in time
$(m) Z$	altitude coordinate
$z_x(m)$	ambient altitude coordinate
β	Energy Quality Factor
ε_{IR}	Infrared radiation factor
ε_M	Product radiation factor
$\mu_c(kJ/kg)$	Chemical potential
$\mu_x(kJ/kg)$	Chemical potential of the environment
$\rho_a(kg/m^3)$	Density of air
$\sigma(W/m^2\ K^4)$	Stephen-Boltzmann Constant
$\eta_{ex}(\%)$	Exergy Efficiency