نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص: ۴۹- ۶۳

J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 2, 2023: 49-63

DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5

بررسی تجربی انرژی و اگزرژی اثر دمای خشک کن و اندازه قطعات بر فرایند خشک کردن زیست توده

رضا آیتی‌نیا[۱]، علی ارشادی[۲و*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، rzayati@gmail.com
۲ *- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، a.ershadi@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

زیست توده، یکی از در دسترس ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر به مواد ارگانیکی همانند چوب، پسماندهای گیاهی و پسماندهای زیستی اطلاق می گردد، مخصوصاً زمانی که از این منابع به عنوان سوخت یا انرژی استفاده شود. میزان رطوبت زیست توده‌ی چوبیِ تازه، عموماً زیاد است و خشک کردن زیست توده‌ی چوب قبل از فرایند حصول انرژی جهت عملکرد و بهره وری بهتر، سودمند می باشد. در این تحقیق، اکسرژی که به صورت پتانسیل کار مفید یک سیستم در یک حالت مشخص تعریف می گردد و تحلیلی مفید در طراحی و بهینه سازی سیستم‌های انرژی می باشد بر روی یک سیستم خشک کن زیست توده به طریق تجربی اعمال شد و دو عامل افت اکسرژی و بهره اکسرژی که معیارهای اصلی در ارزیابی این سیستم‌ها هستند به وسیله تغییر برخی پارامترها، برای این خشک کن محاسبه گردید. در تحقیق حاضر، خشک کردن زیست توده، به وسیله‌ی یک خشک کن خانگی انجام شد. در این آزمایش‌ها سه دمای هوای ورودی متفاوت، ۶۰، ۸۰ و oC100 و دو اندازه‌ی متفاوت ریز و درشت ذرات مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد، مقادیر بالاتر دمای هوای ورودی باعث افزایش مقادیر افت اکسرژی و کاهش مقادیر بهره‌ی اکسرژی می گردد. همچنین مقادیر کوچکتر ذرات باعث کاهش افت اکسرژی و افزایش بهره‌ی اکسرژی می شود. تغییر پارامترهای فوق روند بهره اکسرژی را از ۲۲ درصد تا ۴۷ درصد افزایش داد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** a.ershadi@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: بیومس، تحلیل اکسرژی، خشک کردن، انرژی‌های تجدید پذیر.

۱- مقدمه

تامین انرژی مورد نیاز بشر امروزه یکی از مهمترین دغدغه‌هایی است که انسان با آن روبرو است. این انرژی زمانی بیشتر حائز اهمیت است که بتوان آن را از منابعی که با محیط زیست سازگار است، تامین نمود. بحران انرژی در حال حاضر در جوامع مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است، با وجود اینکه انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی رشد روز افزون جوامع مختلف بشری را از دیدگاه اقتصادی در بر داشته اند، اما وجود آلاینده‌های فراوان در منابع فسیلی، جوامع اقتصادی را بر آن داشت تا به منابع پاک، همچون انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورند. تقاضای انرژی در جهان به طور قابل ملاحظه ای در حال رشد است، و امروزه نزدیک به ۸۸ درصد از این تقاضا را انرژی‌های فسیلی تامین می کنند. مشاهدات نشان داده اند که تقاضای انرژی در قرن حاضر

نحوه استناد به این مقاله: رضا آیتی‌نیا، علی ارشادی. بررسی تجربی انرژی و اگزرژی اثر دمای خشک کن و اندازه قطعات بر فرایند خشک کردن زیست توده. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۳) : ۴۹-۶۳.
DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

با ضریب ۲ یا ۳ در حال رشد است [۱]. همچنین بر اساس پیمان کیوتو (Kyoto) که پیمانی برای کاهش گازهای گلخانه ای به عنوان یکی از اصلی ترین منابع گرم کننده کره زمین می باشد، جایگزینی سوخت‌های پاک و انرژی‌های تجدید پذیر می بایست در دستور کار کشورهای متعهد به این پیمان قرار گیرد [۲]. بیومس یا زیست توده از جمله انرژی‌هایی است که در سال‌های اخیر سهم عمده ای را در تولید انرژی در جهان داشته است. بر اساس تحقیقی که لائوری و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام دادند نتایج خوبی حاصل شد، نتایج پژوهش ایشان نشان داد با استفاده از بکارگیری یک مدل اقتصادی انرژی می توان سهم مصرف انرژی جهان در سال ۲۰۵۰ را که از انرژی‌های حاصل از بیومس می باشد، نزدیک به ۱۸ درصد تخمین زد. همچنین در سال ۲۰۱۰ بیومس چوب ۹ درصد مصرف انرژی جهان و ۶۵ درصد مصرف انرژی‌های تجدید پذیر را دارا می باشد [۳]. زیست توده را می توان از دیدگاه‌های مختلفی تعریف کرد. به عنوان یک تعریف ساده می توان گفت بیومس شامل کلیه مواد موجود در طبیعت است که در گذشته‌ی نزدیک جاندار بوده اند و از موجودات زنده به عمل آمده اند. به عنوان تعریف دیگر می توان گفت، هر ارگانیسم زنده ای که انرژی خورشید را جذب نموده و در خود به صورت ذخیره نگه می دارد بیومس نامیده می شود. آنچه باعث تفاوت بین منابع زیست توده و منابع فسیلی می شود، این است که منابع فسیلی بر خلاف منابع زیست توده در گذشته‌ی بسیار دور زنده بوده اند و تحت دما و فشار زیاد در لایه‌های زمین تشکیل شده اند اما طبق تعریف، منابع زیست توده در گذشته نزدیک جاندار بوده اند. حال زیست توده می تواند باقیمانده‌ی محصولات کشاورزی، فضولات دامی و لجن فاضلاب‌های شهری، پسماندهای زیستی و زباله‌های شهری حاصل از مواد غذایی و همچنین چوب و برگ درختان باشد [۴]. فرایند تبدیل انرژی از زیست توده روش‌های مختلفی دارد. در یک دسته بندی عمده می توان روش‌های شیمیایی، ترموشیمیایی و بیوشیمیایی را بیان کرد. شاید بتوان گفت روش‌های ترموشیمیایی پیچیده ترین و تکنولوژیک ترین روش‌های موجود در تبدیل انرژی از بیومس هستند. اگر چه احتراق مستقیم (سوختن چوب) از گذشته‌های دور برای حصول انرژی از بیومس مورد استفاده قرار می گرفته است، اما روش‌های ترموشیمیایی جدید تری همچون گاسیفیکاسیون (Gasification) (گازی سازی) از جمله روش‌های ترموشیمیایی هستند که امروزه بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. به طور کلی گازی سازی فرایند تبدیل یک سوخت جامد که حاوی کربن بوده، به گاز می باشد که به آن گاز سنتز(Synthesis Gas) می گویند. در این فرایند مقادیر ثانویه ای از مواد به صورت مایع و جامد باقی می ماند [۵]. فرآیند گازی سازی در ۴ مرحله صورت می گیرد که به ترتیب عبارتند از:

۱- مرحله‌ی خشک کردن ۲ - پیرولیز (Pyrolysis) (تجزیه‌ی بیومس در اثر حرارت)

۳- مرحله‌ی اکسیداسیون (Oxidation) ۴- مرحله‌ی تبدیل یا احیاء

در ابتدایی ترین مرحله یعنی خشک کردن، بیومس خام که حاوی مقادیر زیادی از رطوبت در حالت اولیه است وارد بخش خشک کن شده و رطوبت درون ماده تبخیر شده و بخار به اتمسفر خارج می شود به طور مثال قطعات چوب چیزی در حدود ۵۵٪ از وزن خود را حاوی آب هستند که در فرایند خشک کردن تا رطوبتی حدود ۲۰٪ می رسد. مرحله‌ی خشک کردن معمولا در دمای پایین تری نسبت به دمای مراحل بعدی قرار دارد و در چیزی در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه‌ی سانتیگراد انجام می پذیرد [۶]. از سوی دیگر در راستای بهینه سازی سیستم‌های انرژی از دیدگاه‌های مختلفی می توان با مسائل برخورد نمود. روشهای مختلفی برای بهینه سازی سیستم‌های انرژی وجود دارد که تحلیل اکسرژی بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک، یکی از مهمترین این روش‌ها است. تحلیل اکسرژی بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک در سالهای اخیر در بسیاری از فرایندهای صنعتی اعمال شده و به جهت بهینه سازی این فرایندها به کار گرفته می شود. اکسرژی یا در دسترس پذیری یا انرژی دسترس پذیر، خاصیتی است که با آن می توان قابلیت تبدیل مقدار معینی انرژی در حالت مشخصی به کار مفید را تعیین کرد. به عبارت دیگر اکسرژی را می توان پتانسیل انجام بیشترین کار برگشت پذیر ممکن توسط سیستم دانست، اگر سیستم فرآیند کاملاً برگشت پذیری را طی کند تا به حالتی برسد که در انتهای فرآیند با محیط در تعادل (مرده)(Dead) باشد [۷].

در زمینه تحلیل اکسرژی در خشک کن‌ها دینسر و شاهین، (۲۰۰۴) مدل جدیدی در آنالیز ترمودینامیکی فرایند خشک کردن ارائه نمودند. آنها با تکیه بر این مطلب که بهره اکسرژی تابعی پارامترهایی از انتقال جرم و انتقال حرارت است، با ارائه یک مثال کاربردی تحلیل خود را تکمیل نمودند. این محققین بر این باورند که نتایج حاصله برای کسانی که نیاز به طراحی و بهینه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

سازی سیستم‌های خشک کن دارند، مفید واقع خواهد شد [۸].

در زمینه توسعه فرایند خشک کردن مواد غذایی و کشاورزی هانی و همکاران، (۲۰۲۲) با انتشار مقاله ای مروری تحت عنوان توسعه های اخیر در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی، اثراتی همچون خشک کردن به روش خورشیدی و هیبریدی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد، خشک کن های خورشیدی اثرات بسزایی در بعد اقتصادی، بازرگانی و بوم زیستی دارا بوده و خشک کن های خورشیدی در دسته بندی های مختلفی از انواع فرایند خشک کردن قابل بهره برداری می باشند [۹]. پرهیزی و همکاران (۲۰۲۲)، با بهینه سازی پارامترهای انرژی و اکسرژی بر روی فرایند خشک کردن خورشیدی برگ ریحان در دماهای ۴۰ و ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی گراد و در بسترهای ۲ و ۴ و ۶ سانتی متری، با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک به این نتیجه رسیدند که بهینه ترین حالت خشک کردن برگ ریحان در دمای ۶۳,۸ و بستر ۲ سانتی متری است [۱۰].

کاوه و همکاران (۲۰۲۱)، آزمایش‌هایی از طریق یک خشک کن طبقاتی تسمه ای در دماهای ۴۰ و ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی گراد با سرعت‌های هوای ۰,۵ و ۱ و ۱,۵ متر بر ثانیه و سرعت‌های ۲,۵ و ۶,۵ و ۱۰,۵ میلیمتر بر ثانیه برای تسمه نقاله بر روی ورقه‌های پیاز انجام دادند. نتایج نشان داد افت اکسرژی از طریق افزایش دما و سرعت هوا و نیز کاهش سرعت تسمه نقاله، افزایش یافته و بهره اکسرژی کاهش می یابد [۱۱]. ورطه پرور و همکاران (۱۳۹۲)، در مقاله ای تحت عنوان تحلیل اکسرژی خشک کن ترکیبی بستر سیال-ثابت، با بررسی پارامترهای موثر بر تلفات و بازدهی اکسرژی در دماها و ضخامت‌های مختلف بستر، به این نتیجه رسیدند که بازده اکسرژی در طبقات بالا بیشتر و افزایش ضخامت طبقه پایین سبب کاهش بازده اکسرژی می شود، در حالی که افزایش ضخامت موجب افزایش بازدهی می شود [۱۲]. توکل بخدا (۱۳۹۳)، کاربرد تحلیل اکسرژی در بهینه سازی سنتز گاز طبیعی از بیومس را بررسی نمود. ایشان کار تحلیل اکسرژی را بر چهار مرحله خشک کردن، تولید گاز، سنتز متان و حذف دی اکسید کربن انجام داد. نتایج نشان داد که در هر ۴ مرحله با افزایش فشار و دما، میزان اتلاف اکسرژی نیز افزایش یافت [۱۳].

شاه بیگ و همکاران (۲۰۲۱)، با هدف مرور روش‌های تحلیل اکسرژی در سیستم‌های گازی سازی بیومس، به تحلیل اثرات ترکیبات ماده، عامل گازی سازی، نوع راکتور گازی سازی و پارامترهای عملیاتی بر بهره اکسرژی در این سیستم‌ها پرداختند. نتایج حاصله تاثیر مثبت مقادیر کربن و هیدروژن در این فرایند را بیان نمود. همچنین ترکیب موجود از دی اکسید کربن و بخار به عنوان واسطه‌ی گازی سازی مقادیر بالایی از بهره انرژی را ارائه می دهد [۱۴]. آغباشلو و همکاران (۲۰۱۳)، با ارائه یک مقاله جامع بر پیشینه‌ی تحقیق در تحلیل اکسرژی انواع خشک کن‌ها، ضمن معرفی توانایی‌ها و فواید در این زمینه، چشم انداز موجود در این حوزه از علم را به دیگر محققینی که در این زمینه قصد تحقیق دارند، معرفی کرده اند [۱۵]. میدیلی و همکاران، (۲۰۰۳) تحلیل اکسرژی بر خشک کردن پسته را توسط خشک کن خورشیدی مطالعه نمودند و نتیجه گرفتند که ساختار و میزان رطوبت عامل موثری بر افزایش مصرف انرژی و کاهش تلفات اکسرژی است [۱۶].

در تحقیقات اخیر، محققان اثر اعمال تحلیل اکسرژی بر روی فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و خوراکی را بررسی نموده اند، لذا با توجه به خلاء موجود در تحلیل اکسرژی فرایند هایی که مربوط به زمینه انرژی های تجدید پذیر می باشند، تمرکز تحقیق حاضر بر روی فرایند خشک کردن زیست توده چوبی می باشد که پیش زمینه ای در صنعت حصول انرژی از زیست توده است..

۲- شرح مسأله

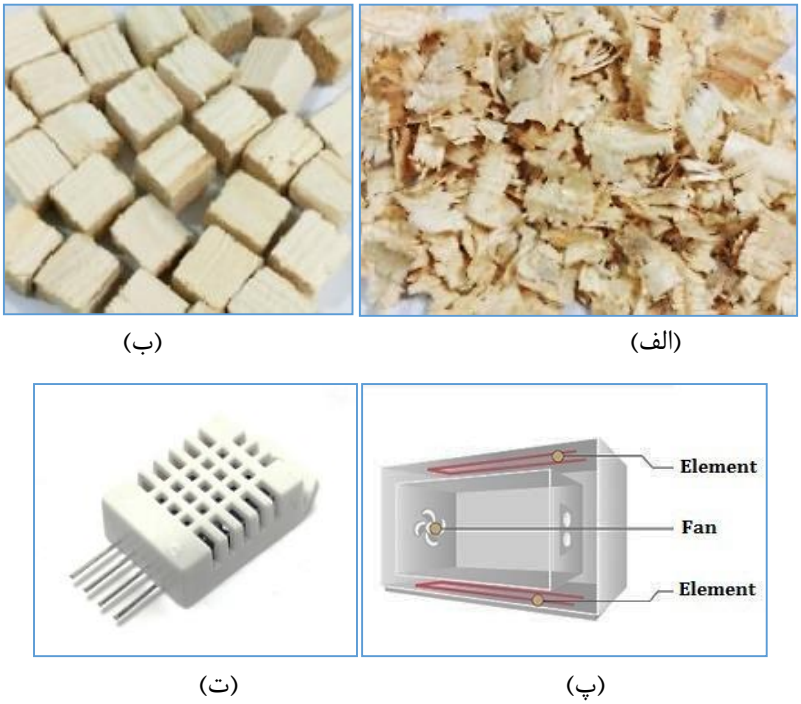
۲-۱- دستگاه آزمایش

در تحقیق حاضر از یک دستگاه آون (Oven) کوچک خانگی (مدل دوو الکترونیک KOC-9UOTPS) برای انجام آزمایش بهره گرفته شد. این دستگاه فرآیند خشک کردن را از طریق جریان هوای اجباری بر ماده اعمال می کند. دستگاه شامل محفظه‌ی خشک کن، دمنده‌ی هوا و سنسور تنظیم دما و بخش کنترل برای میزان دما و زمان آزمایش می باشد. همچنین قدرت خروجی دستگاه ۹۰۰ وات و ورودی آن ۱۹۵۰ وات می باشد. وزن دستگاه حدود ۱۸/۲ کیلوگرم و ولتاژ کاری آن ۲۴۰ -۲۲۰ ولت می

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

باشد. با توجه به ساختار دستگاه که دارای دو بدنه‌ی خارجی و بدنه‌ی داخلی به صورت مجزا است (محفظه‌ی خشک کن) از اتلافات حرارتی از دیواره‌ها صرف نظر شده و تلفات بدنه ناچیز فرض شده است. برای سنجش میزان جرم مواد (جهت محاسبه درصد رطوبت) از ترازوی دیجیتالی (مدل NASA) با دقت ۱± گرم استفاده شده است. همچنین برای سنجش دمای خروجی محفظه و دمای اتاق از دو دماسنج با دقت ۰٫۱± درجه سانتیگراد (مدل DHT-22) که در شکل ۱ نشان داده شده است و دیگری با دقت ۱± درجه‌ی سانتیگراد (مدل Chuangxin) استفاده شده است.



شکل ۱: الف) قطعات درشت (Coarse) بیومس، ب) قطعات کوچک (Fine) بیومس، پ) سنسور DHT-22 جهت اندازه گیری دما، (ت) تصویر دستگاه خشک کن

ماده‌ی استفاده شده در فرایند خشک کردن، بیومسی از نوع چوب روسی از درخت کاج است که همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، در اندازه‌های مختلف به صورت قطعه ای درآمده است. قبل از انجام آزمایش ذرات در دو اندازه‌ی متفاوت بریده شده و آماده‌ی انجام آزمایش شدند. این قطعات به دو دسته‌ی : ۱- خرده چوب (Fine) که به صورت قطعات رنده شده و ۲- قطعات چوب درشت (Coarse) به صورت مکعب‌هایی به طول ۲ سانتی متر هستند تهیه گردید. برای سادگی در نحوه نگارش، در ادامه‌ی متن از حرف F برای خرده چوب و از حرف C برای قطعات چوب درشت استفاده می گردد. ضمنا ناخالصی‌ها و ذرات ریز از مواد آزمایش جدا شده و اندازه‌ی ذرات همگن در نظر گرفته شده است.

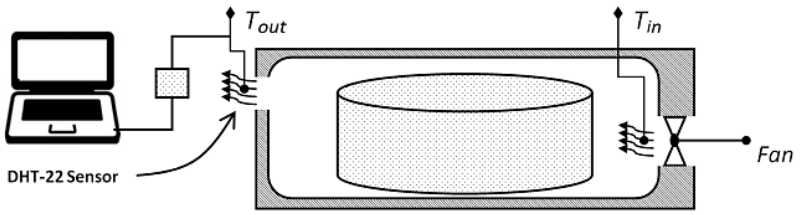
۲-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش

آزمایش‌ها در دمای محیط با ۲۷ درجه سانتیگراد و در مدت زمانی برابر با ۳۵ دقیقه (۲۱۰۰ ثانیه) انجام شد. دمای هوای خروجی و دمای هوای وارد شده و جرم مواد، هر ۳۰۰ ثانیه اندازه گیری و از آن برای محاسبه‌ی میزان رطوبت، اکسرژی ورودی، اکسرژی خروجی و اتلافات اکسرژی و نیز بهره‌ی اکسرژی استفاده گردید.

قبل از شروع آزمایش جرم قطعات خشک چوب برای انجام هر آزمایش اندازه گیری و با جدا کردن ناخالصی‌ها مقادیری آب به آنها اضافه و محتوای رطوبت آنها اندازه گیری شد. برای اطمینان از همگن بودن رطوبت موجود در ماده، هنگام اضافه کردن

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

رطوبت، مواد مرتباً هم زده می شد. در شروع آزمایش قطعات چوب در ظرف آزمایش قرار داده شد و با اندازه گیری جرم آنها، درون محفظه‌ی خشک کن قرار گرفتند. آزمایش‌ها در سه دمای ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد و اندازه‌های خرده چوب و قطعات درشت به ترتیب به شکل F-۶۰ و F-۸۰ و F-۱۰۰ و C-۶۰ و C-۸۰ و C-۱۰۰ انجام شد که حروف F و C به ترتیب بیانگر خرده چوب و قطعات درشت چوب هستند. شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۲ : شماتیک دستگاه استفاده شده در آزمایش خشک کردن

۳- بخش نظری

قانون دوم ترمودینامیک بیانگر مفهوم اکسرژی در آنالیز سیستم‌های حرارتی است. تحلیل اکسرژی میزان انرژی در دسترس را در نقاط مختلف سیستم برآورد می کند. اکسرژی معیاری از کیفیت و یا درجه‌ی انرژی است و طبق اصل اتلاف اکسرژی در یک سیستم حرارتی، می تواند تباه گشته و افت پیدا کند. قانون دوم بیانگر بخشی از اکسرژی است که وارد یک سیستم حرارتی شده و به صورت سوخت، الکتریسیته، جریان‌های سیال در یک ماده و یا دیگر منابع است و در طی این فرآیند با توجه به بازگشت ناپذیری‌ها افت پیدا می کند. قانون دوم ترمودینامیک از یک بالانس اکسرژی برای آنالیز و طراحی سیستم‌های حرارتی استفاده می کند. از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک مجموع اکسرژی‌های ورودی، خروجی و افت‌های محفظه‌ی خشک کن تخمین زده شده اند و رویه‌ی آنالیز اکسرژی برای محفظه‌ی خشک کن تعیین مقادیر اکسرژی در نقاط پایا و تعیین علت‌های تغییر اکسرژی برای فرایند است. به همین منظور فرمول بندی ریاضی برای بالانس اکسرژی به صورت زیر حاصل می گردد [۱۷و۱۸].

$$\phi = \left(u - u_\infty\right) + P_\infty\left(v - v_\infty\right) - T_\infty\left(s - s_\infty\right) + \frac{V^2}{2} + gz \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی بالا اندیس ∞ به معنای شرایط محیطی است. در تحلیل اکسرژی بسیاری از سیستم‌ها فقط بخشی از ترم‌هایی که در رابطه‌ی بالا هستند، استفاده می شود و همه‌ی ترم‌ها بسته به مسأله‌ی موجود مورد استفاده قرار نمی گیرند. با توجه به اینکه اکسرژی، انرژی موجود و در دسترس از هر منبع انرژی است، می تواند توسط جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی و یا شاری از مواد سیال حاصل گردد. یک ساده سازی رایج در این نوع از مسائل تعویض ترم آنتالپی به جای ترم انرژی داخلی و ترم PV است $(h = u + pv)$ ، که در سیستم‌های با جریان پایا کاربرد دارد. معادله‌ی بالا اغلب در شرایطی که ترم‌های نیروی گرانش و مومنتوم ناچیز در نظر گرفته می شوند، استفاده می گردد. علاوه بر این تغییرات فشار در سیستم نیز گاهاً ناچیز فرض می گردد چون $V \cong V_\infty$ بنابراین معادله به صورت زیر حاصل می گردد:

$$\phi = (h_2 - h_1) - T_\infty(s_2 - s_1) \qquad (۲)$$

که در آن :

$$h_2 - h_1 = \bar{C}_p(T - T_\infty) \qquad (۳)$$

$$s_2 - s_1 = \bar{C}_p[\ln(\frac{T}{T_\infty})] \qquad (۴)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

که برابر است با:

$$Ex = \bar{C}_{pda}\left[(T - T_\infty) - T_\infty(\ln\frac{T}{T_\infty})\right] \quad (۵)$$

با توجه به رابطه بالا میزان اکسرژی در نقاط ورودی و در خروجی به صورت زیر بدست می آیند [14] :

$$Ex_{in} = \bar{C}_{pda}\left[(T_{in} - T_\infty) - T_\infty\left(\ln\frac{T_{in}}{T_\infty}\right)\right] \quad (۶)$$

$$Ex_{out} = \bar{C}_{pda}\left[(T_{out} - T_\infty) - T_\infty\left(\ln\frac{T_{out}}{T_\infty}\right)\right] \quad (۷)$$

از رابطه‌ی بالا میزان اکسرژی ورودی و خروجی بر اساس دماهای ورودی و خروجی محفظه‌ی خشک کن حاصل می گردد. از این رو افت اکسرژی نیز توسط رابطه‌ی زیر حاصل می گردد :

$$Ex_{loss} = Ex_{in} - Ex_{out} \quad (۸)$$

همچنین بهره‌ی اکسرژی به صورت نسبت اکسرژی حاصل شده به اکسرژی ورودی برای محفظه‌ی خشک کن است [۱۴].

$$\eta = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (۹)$$

۴- خطای آزمایش

عدم قطعیت در نتایج می تواند در اثر تغییر در دمای اتاق و یا خطای اندازه گیری جرم مواد و یا خطای اندازه گیری دمای ورودی و خروجی و یا تغییرات در توان برق ورودی به سیستم خشک کن باشد. خطای حاصل از تغییرات دمای محیط و دماهای ورودی و خروجی به ازای هر ۰/۱ درجه سانتیگراد تغییر دما، حداکثر برابر با ۰/۳ درصد در بهره اکسرژی می باشد. این خطا از طریق جایگذاری مقادیر دما در رابطه‌ی (۵) محاسبه شد.

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

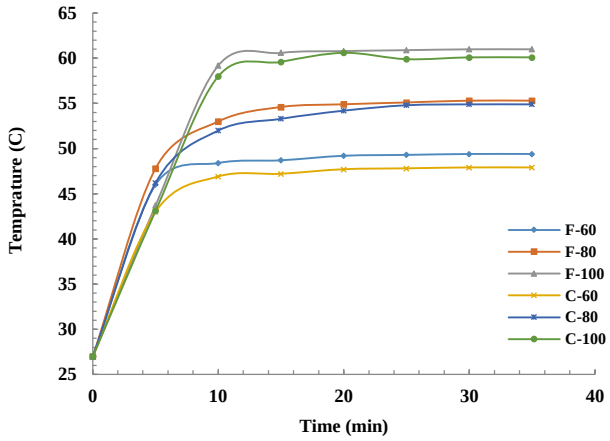
در این بخش به تحلیل و بررسی نتایج حاصل شده از تغییر پارامترها و مقایسه آنها می پردازیم. در نهایت نتیجه گیری کلی در رابطه با این تحقیق مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۳ مقادیر دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن را در شش حالت‌های مختلف نشان می دهد.

شکل ۳ نشان دهنده دمای هوای خروجی از محفظه خشک کن در طول زمان هر آزمایش است. همانگونه که مشاهده می گردد، در مراحل ابتدایی فرایند خشک کردن پروفیل‌های دمایی تقریباً یکسان هستند و هر چه فرایند خشک کردن پیش می رود دما نیز افزایش می یابد. همچنین همان گونه که مشخص است، پروفیل‌های دما در حالتهایی که ذرات دارای اندازه کوچک هستند (حالت Fine) نسبت به حالتی که ذرات اندازه درشت دارند (حالت Coarse) با نرخ بیشتری پیشرفت کرده و نمودارهای حالت F بالاتر از نمودارهای حالت C قرار می گیرند. به نظر می رسد علت این مسئله آن است که لایه‌ی خشک در حالت F زودتر تشکیل می شود و یک رشد دمای ناگهانی اتفاق می افتد. از سوی دیگر در حالت C دما به طور آهسته تر از حالت F رشد می کند که علت آن تشکیل دیرتر لایه خشک است. در شکل ۳ تئوری تشکیل لایه خشک و آب موجود در سطح در فرایند

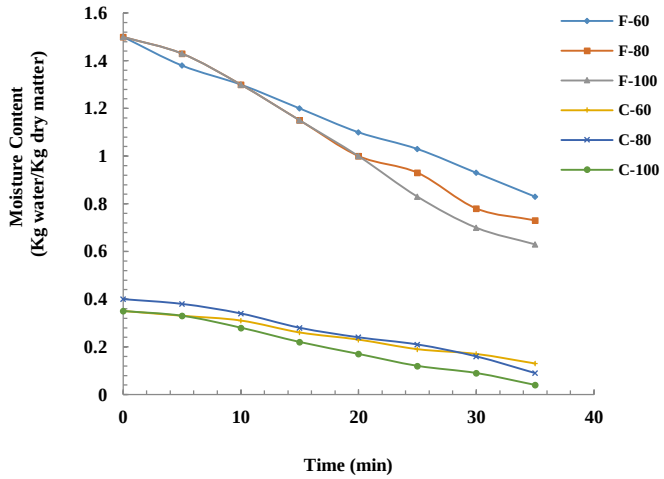
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

خشک کردن و همچنین تغییرت دمایی قابل مشاهده است. شکل ۴ مقادیر رطوبت موجود در مواد را در هر شش حالت‌های مختلف نشان می دهد.



شکل ۳ : تغییرات دمای هوای خروجی در حالت‌های مختلف



شکل ۴: روند کاهش رطوبت مواد در حالت‌های مختلف

شکل ۴ نشان دهنده مقادیر رطوبت موجود در مواد در طول زمان فرایند خشک کردن است. همانگونه که مشاهده می گردد در حالتهایی که ذرات دارای شکل یکسانی هستند مقادیر رطوبت اولیه تقریباً برابر است و مواد از لحاظ مقادیر اولیه رطوبت از همگنی مناسبی برخوردار هستند. در شکل مشهود است که با گذشت زمان میزان رطوبت موجود در مواد کاهش می یابد. نتایج شکل نشان می دهد که مراحل ابتدایی فرایند خشک شدن و افت رطوبت در حالتهایی که اندازه ذرات یکسان است، تقریباً برابر است. در ادامه فرایند میزان رطوبت کاهش می یابد.

در شکل مشخص است که میزان افت رطوبت در حالت F بیشتر از حالت C است و به نظر می رسد علت این است که رطوبت مواد در حالت F (با توجه به فشار موبینگی بیشتر) توانایی بیشتری برای رسیدن به سطح خارجی ماده دارد و این مسئله باعث افزایش نرخ از دست رفتن رطوبت در حالت F می شود. از سوی دیگر در حالت C پروفیل‌های نرخ خارج شدن رطوبت (به علت فشار موبینگی کمتر) در مقایسه با حالت F کمتر است. ادامه فرایند در هر حالت نشان دهنده‌ی کاهش نرخ رطوبت زدایی در مراحل انتهایی می باشد. همچنین در شکل مشهود است که افزایش دما باعث افزایش شیب نمودار می شود که به معنای آن است که با افزایش دما، در یک زمان مشخص، میزان رطوبت کمتری در ماده وجود دارد. جدول ۱ مقادیر اکسرژی ورودی به

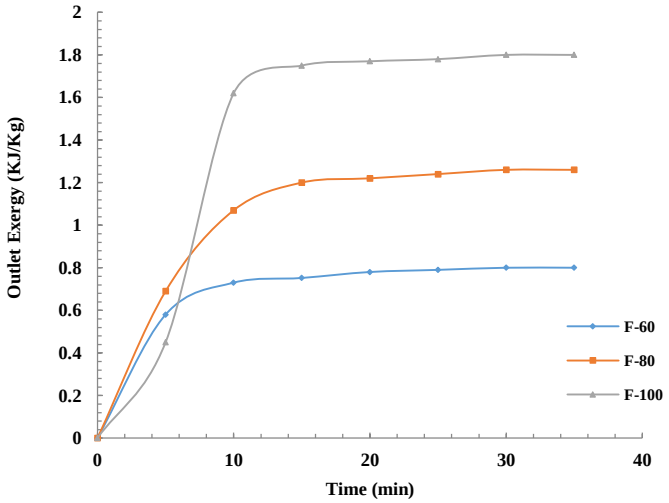
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

محفظه خشک کن را در دماهای مختلف نشان می دهد. از این مقادیر در ادامه برای محاسبه‌ی مقادیر افت اکسرژی و نیز بهره اکسرژی استفاده می گردد.

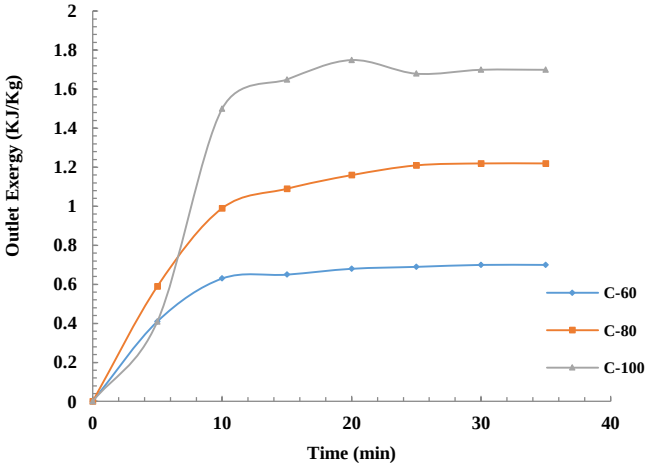
جدول ۱: مقادیر اکسرژی ورودی برای دماهای مختلف

دمای ورودی(سانتیگراد)	۶۰	۸۰	۱۰۰
اکسرژی ورودی(کیلو ژول بر کیلوگرم)	۱/۶۹	۴/۲۱	۷/۶۹

شکل ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر اکسرژی خروجی را از محفظه‌ی خشک کن را در دماهای ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ و اندازه‌های متفاوت نشان می دهند. همان گونه که مشخص است با گذشت زمان مقادیر اکسرژی در خروجی محفظه در حال افزایش است، همچنین افزایش دما باعث افزایش مقادیر اکسرژی در خروجی از محفظه می گردد.



شکل ۵ : تغییرات اکسرژی خروجی از محفظه برای ذرات ریز در دماهای مختلف

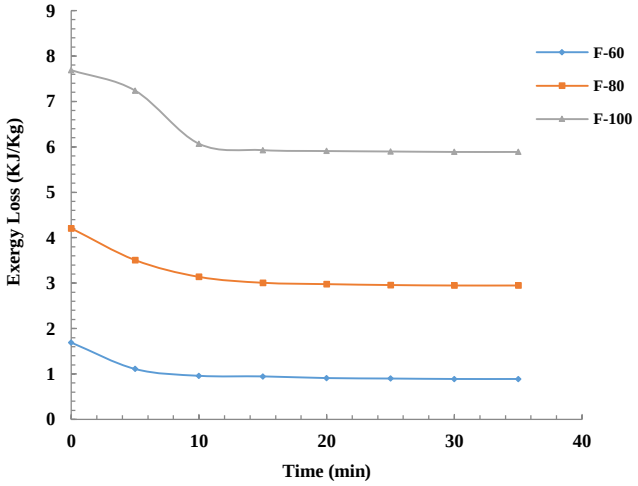


شکل ۶ : تغییرات اکسرژی خروجی از محفظه برای ذرات درشت دماهای مختلف

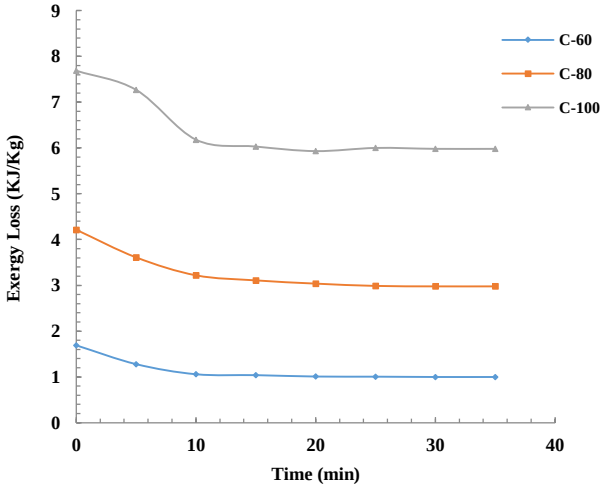
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

شکل ۷ میزان تلفات اکسرژی بر حسب زمان در دماهای ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد در اندازه‌ی کوچک ذرات (F) را نشان می دهد همچنین شکل ۸ میزان تلفات اکسرژی بر حسب زمان در دمای ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد در اندازه‌ی درشت ذرات (C) می باشد. تحلیل اکسرژی با استفاده از رابطه‌ی (۵) وابسته به دمای محیط و دمای ورودی محاسبه شده است. اکسرژی ورودی و خروجی به ترتیب از طریق رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه شده اند. مشاهده گردید که اکسرژی خروجی از محفظه‌ی خشک کن در طول زمان به آرامی در حال افزایش است و در نتیجه اتلاف اکسرژی در طول زمان مرتباً و به آرامی در حال کاهش است. به نظر می رسد که این مسئله بخاطر کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها با گذشت زمان است و توانایی ماده برای استفاده از اکسرژی برای تبخیر شدن به شکل متوالی کاهش می یابد. بنابراین هوای خروجی نسبت بیشتری از اکسرژی ورودی را با خود دارا می باشد. همان گونه که مشخص است، افزایش دمای هوای خشک کن باعث افزایش اتلافات اکسرژی می شود، زیرا دمای خشک کردن بالاتر، میزان اکسرژی ورودی بیشتری دارا بوده و مقادیر بزرگتری از اکسرژی ورودی جهت تبخیر آب مورد بهره قرار می گیرد. بنابراین اکسرژی بیشتری در محفظه خشک کن استفاده می شود که علت آن مقدار بیشتر انتقال جرم و انتقال حرارت است. روند تغییرات اکسرژی در این حالت‌ها و نیز نتایج موجود مشابهت خوبی با نتایج حاصل شده از مراجع [۱۷] و [۱۹] و [۲۰] دارد.



شکل ۷ : تغییرات تلفات اکسرژی برای ذرات ریز در دماهای مختلف



شکل ۸ : تغییرات تلفات اکسرژی برای ذرات درشت دماهای مختلف

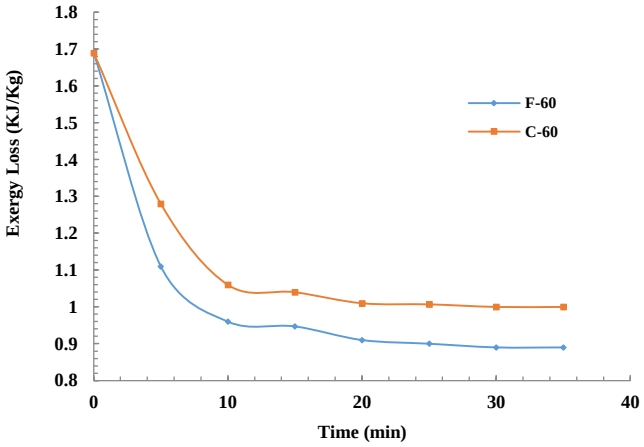
۵-۱- بررسی تاثیر اندازه‌های متفاوت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

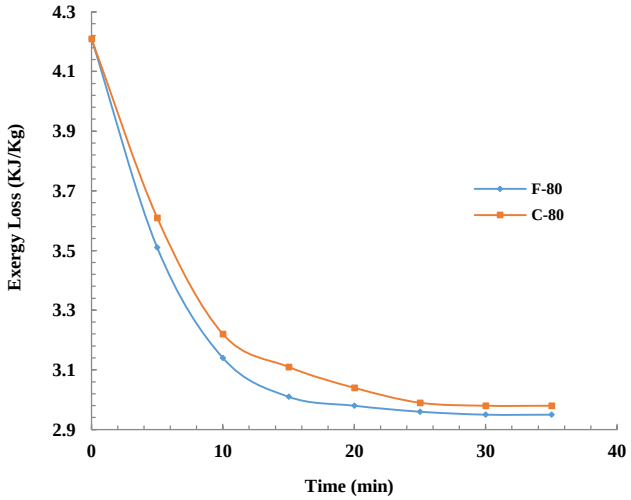
شکل ۹ روند تلفات اکسرژی در شرایطی که دمای ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد و اندازه ذرات متفاوت است را نشان می دهد. همچنین شکل ۱۰ روند تلفات اکسرژی در شرایطی که دمای ثابت ۸۰ درجه سانتیگراد و اندازه ذرات متفاوت است را نشان می دهد. شکل ۱۱ نیز روند تلفات اکسرژی در شرایطی که دمای ثابت ۱۰۰ درجه سانتیگراد و اندازه ذرات متفاوت است را نشان می دهد.

همانگونه که در شکل‌های ۹ و نیز ۱۰ و ۱۱ مشهود است مقادیر اتلافات اکسرژی در طول زمان به طور متوالی در حال کاهش است. و این مسئله می تواند به خاطر کاهش مقادیر رطوبت در مواد باشد. از سوی دیگر در هر شکل مشخص است که مقادیر اتلافات اکسرژی در حالتهایی که ذرات دارای اندازه کوچک (Fine) هستند، اگر چه با اختلاف کم ولی پایین تر از حالت دیگر یعنی حالت درشت (Coarse) قرار می گیرند. به این معنا که کاهش اندازه ذرات باعث کاهش اتلافات اکسرژی می گردد.

این مسئله را می توان این گونه توجیه کرد که وجود سطح تماس بیشتر با هوای گرم در حالتی که اندازه ذرات کوچکتر است، باعث می شود که مواد بتوانند اکسرژی بیشتری از هوای گرم دریافت کنند.



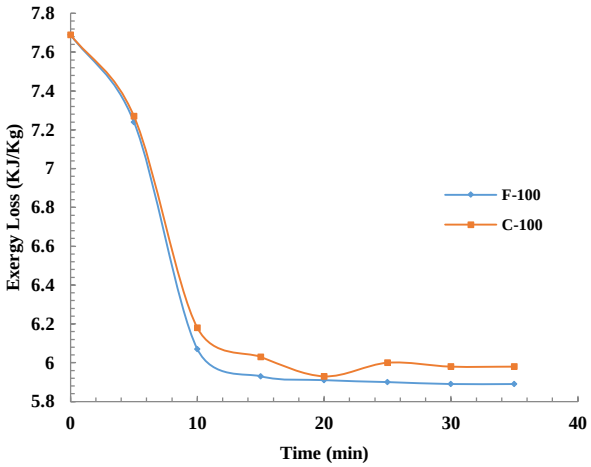
شکل ۹ : روند تلفات اکسرژی در دمای ۶۰ درجه



شکل ۱۰ : روند تلفات اکسرژی دمای ۸۰ درجه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]



شکل ۱۱ : روند تلفات اکسرژی در دمای ۱۰۰ درجه

۵-۲- روند تغییرات بهره اکسرژی در طول زمان

شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مقادیر بهره اکسرژی در طول زمان و میانگین بهره اکسرژی محفظه خشک کن را در شش حالت F-۶۰ و F-۸۰ و F-۱۰۰ و C-۶۰ و C-۸۰ و C-۱۰۰ نشان می دهد. شکل ۱۲ نشان دهنده مقادیر بهره اکسرژی در طول زمان در آزمایش‌های مختلف است. مقادیر بهره اکسرژی با استفاده از رابطه‌ی ۹ و بر اساس مقادیر اکسرژی ورودی و اکسرژی خروجی محفظه‌ی خشک کن مورد محاسبه قرار گرفت. در شکل ۱۲ مشهود است که در طول زمان مقادیر بهره اکسرژی در هر آزمایش مرتباً در حال افزایش است. این مسئله بخاطر آن است که در طول فرایند خشک کردن مقادیر انرژی موجود در محفظه‌ی خشک کن مرتباً در حال افزایش یافتن است و علت آن هم کاهش مقادیر رطوبت در ماده‌ی خشک شونده می باشد. همچنین در شکل ۱۲ مشهود است که با افزایش دمای خشک کن مقادیر بهره‌ی اکسرژی کاهش می یابد و مقادیر بهره‌ی اکسرژی در حالت‌هایی که دما بالاتر است پایین تر از حالتهایی است که دما کمتر است. این مسئله می تواند به این علت باشد که با وجود افزایش دمای هوای ورودی و اکسرژی ورودی، از سوی دیگر مقادیر بیشتری هم از هوای گرم در خروجی از محفظه خشک کن خارج می شود که خود، عامل اصلی از دست رفتن مقادیر زیادی از اکسرژی است. از سوی دیگر همان گونه که در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ مشخص است در حالتی که در دماهای یکسان، اندازه ذرات، درشت (Coarse) باشد مقادیر بهره‌ی اکسرژی با اختلاف اندکی پایین تر از نمودارهای مربوط به حالت خرده چوب (Fine) قرار می گیرند. به این معنا که با افزایش اندازه‌ی ذرات، مقادیر بهره اکسرژی کاهش می یابد. به نظر می رسد که ذرات کوچکتر ماده خشک شونده به خاطر سطح تماس بیشتری که با هوای خشک کن دارند، توانایی جذب اکسرژی بیشتری را دارا می باشند.

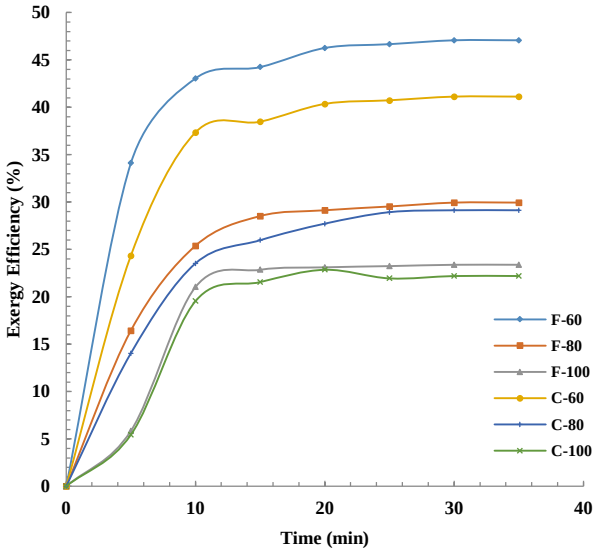
۶- نتیجه گیری

برای رسیدن به شرایط بهینه و حالتی که در آن افت اکسرژی کیمنه و بهره اکسرژی بیشینه باشد، پارامترهای دمای ورودی خشک کن و اندازه ذرات بیومس در آزمایشهای مختلفی تغییر داده شد. در طول آزمایش‌ها مشاهده شد که روند اتلافات اکسرژی در هر آزمایش با گذشت زمان در حال کاهش است. و این مسئله بخاطر افزایش اتلافات در خروجی است. نتایج آزمایشات نشان داد که افزایش دمای هوای خشک کن باعث افزایش اتلافات اکسرژی می گردد که علت آن می تواند وجود اتلافات زیاد در خروجی محفظه خشک کن باشد.

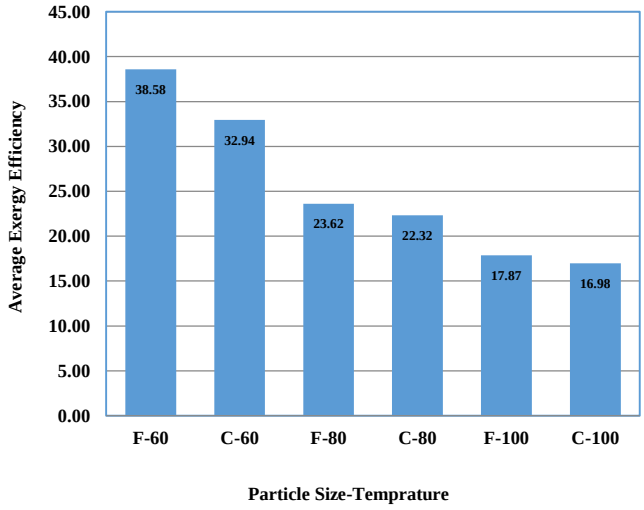
مسئله وجود اتلافات زیاد در خروجی محفظه این نوع خشک کن‌ها یکی از عمده ایرادات این نوع خشک کن‌ها می باشد که باید روشهایی برای جلوگیری از هدر رفت انرژی و کاهش اتلافات در این نوع خشک کن‌ها یافت. همچنین مشاهدات نشان داد که افزایش اندازه ذرات باعث افزایش اتلافات اکسرژی و نیز اکسرژی خروجی است. بهره اکسرژی در محفظه خشک کن با گذشت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

زمان در هر آزمایش روندی رو به افزایش داشت و این مسئله به علت آن است که انرژی موجود در محفظه خشک کن با گذشت زمان در حال افزایش است، چون مقادیر رطوبت موجود در ماده در طول زمان رو به کاهش است.



شکل ۱۲ : روند تغییرات بهره اکسرژی در حالت‌های مختلف



شکل ۱۳ : میانگین تغییرات بهره اکسرژی در حالت‌های مختلف

به طور کلی بهره وری انرژی در خشک کن‌ها باید از طریق کنترل و بهینه سازی پارامترهای خشک کردن افزایش یابد تا بتوان عملکرد این نوع سیستم‌ها را به طور ویژه افزایش داد. استفاده از هوای خروجی از محفظه خشک کن، محاسبه مقادیر اتلافات ناشی از بدنه و بهینه سازی هندسه‌ی خشک کن‌ها از مواردی است که می تواند مهندسین را در راه رسیدن به طراحی بهینه خشک کن‌ها کمک کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

۷- فهرست علایم و نشانه‌ها

فهرست واحد خواص

ذره‌ی درشت	C
ظرفیت گرمایی ویژه	C_P (kJ/kgK)
ذره‌ی ریز	F
ثابت گرانش	g (m/s^2)
آنتالپی	h (kJ)
جرم	m (kg)
جرم مولکولی	M (kg/mol)
فشار	P (kPa)
گرما	Q (kJ)
ثابت گازها	R (J/K. mol)
آنتروپی	s (kJ/kg. K)
دما	T (K)
انرژی داخلی	U (kJ/kg)
حجم	v (m^3)
سرعت	V (m/s)
کار	W (J)
رطوبت مطلق	Y
ارتفاع	z (m)

فهرست علائم یونانی

اکسرژی مخصوص	ϕ(kJ/kg)
اکسرژی	ψ (kJ)

فهرست زیر نویس‌ها

ورودی	in
افت	loss
خروجی	out
محیط	∞

مراجع

[1] Weiland, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. Applied microbiology and biotechnology, 85(4), pp.849-860.

[2] Saidur, R., BoroumandJazi, G., Mekhilef, S. and Mohammed, H.A., 2012. A review on exergy analysis of biomass based fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), pp.1217-1222.

[3] Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H. and Obersteiner, M., 2014. Woody biomass energy potential in 2050. Energy Policy, 66, pp.19-31.

[4] Ghaemi, F., & Sadeghi, H., 2014, Feasibility study of fueling the Iran rural areas by biogas from livestock waste. Journal of Research & Rural Planning, 3(5), 121-134.[In Persian]

[5] Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes, NNFCC 09-008, National non-food Crops Center, http://www.nnfcc.co.uk/

[6] Carlassara, L., 2009. Modeling and Optimization of Biomass Gasification System (Doctoral dissertation, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

[7] Yunus, A.C. and Michael, A.B., 2006. Thermo-dynamics: An engineering approach. McGraw-Hill, New York.

[8] Dincer, I. and Sahin, A.Z., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(4), pp.645-652.

[9] EL-Mesery, H.S., EL-Seesy, A.I., Hu, Z. and Li, Y., 2022. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *157*, p.112070.

[10] Parhizi, Z., Karami, H., Golpour, I., Kaveh, M., Szymanek, M., Blanco-Marigorta, A.M., Marcos, J.D., Khalife, E., Skowron, S., Adnan Othman, N. and Darvishi, Y., 2022. Modeling and optimization of energy and exergy parameters of a hybrid-solar dryer for basil leaf drying using RSM. Sustainability, 14(14), p.8839.

[11] Kaveh, M., Chayjan, R.A., Golpour, I., Poncet, S., Seirafi, F. and Khezri, B., 2021. Evaluation of exergy performance and onion drying properties in a multi-stage semi-industrial continuous dryer: Artificial neural networks (ANNs) and ANFIS models. Food and Bioproducts Processing, 127, pp.58-76.

[12] Vartehparvar, V., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Hasanbeigi, S.R., 2013, Exergy Analysis of Combined Fluidized-Fix Bed Dryer Vol. 32, Issue 2, pp. 47-55 [In Persian]

[13] Tavakolbekhoda, N., Ashrafizadeh, S.A., 2015, Optimization of Gas Production from Biomass Using Exergy Analysis, First international conference of assessment in management and environment in Iran, Hamedan, Iran [Conference Paper, In Persian]

[14] Shahbeig, H., Shafizadeh, A., Rosen, M.A. and Sels, B.F., 2022. Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review. Biofuel Research Journal, 9(1), p.1592..

[15] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S. and Madadlou, A., 2013. A review on exergy analysis of drying processes and systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, pp.1-22.

[16] Midilli, A., and H. Kucuk. "Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio." Energy 28, no. 6 (2003): 539-556.

[17] Prommas, R., Rattanadecho, P. and Cholaseuk, D., 2010. Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(4), pp.372-378.

[18] Dincer, I. and Rosen, M.A., 2012. Exergy: energy, environment and sustainable development. Newnes.

[19] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Arabhosseini, A., 2008. Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. Drying Technology, 26(12), pp.1501-1508.

[20] Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H. and Aghbashlo, M., 2010. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. Energy, 35(12), pp.4679-4684.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

چکیده انگلیسی

Experimental study of energy and exergy analysis of the effect of dryer temperature and particle size on biomass drying process

Reza Ayatinia[1], Ali Ershadi[1*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: January 2023 Accepted: May 2023

Abstract

In this research the exergy analysis of a biomass drying system were investigated experimentally by varying some drying parameters and exergy loss, exergy efficiency as the two principal factors in analyzing systems were calculated for this dryer. Exergy is defined as useful work potential of a system in a specified state. Exergy analysis is a powerful tool in design and optimization of energy systems. Biomass, one of the most available renewable energies is defined as organic materials, such as wood, agricultural wastes, and municipal biowastes, especially when used as a source of fuel or energy. The moisture content of fresh woody biomass is typically high and it is beneficial to dry woody biomass before the process of energy yield for better performance and efficiency. In this research Drying experiments were performed in a domestic dryer. In these experiments three different inlet air temperatures, 60, 80 and 100^{o}C and two different particle sizes of fine and coarse were considered. The results showed that the higher inlet air temperatures caused higher values of exergy loss and lower values of exergy efficiency. Also the fine particle size decreased the exergy loss and increased the exergy efficiency. Variation of parameters has changed exergy efficiency from 22 to 47 percent.

Key words: Biomass, Exergy Analysis, Renewable Energies, Drying.

*corresponding author: a.ershadi@iaud.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5]

Cite this article as: Reza Ayatinia, Ali Ershadi. Improving Experimental study of energy and exergy analysis of the effect of dryer temperature and particle size on biomass drying process. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(2), 49-63. **DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.5.5**