

تحلیل اکسرژی خشک کن ترکیبی بستر سیال - ثابت

وحید ورطه پرور*⁺، محمد حسین کیانمهر، اکبر عرب حسینی، سید رضا حسن بیگی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، گروه فنی کشاورزی

چکیده: یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای تحلیل انرژی مورد توجه قرار گرفته است تحلیل اکسرژی می‌باشد. به منظور کاهش مصرف انرژی، یک روش خشک کنی طراحی شده است که از ترکیب دو نوع خشک کن بستر سیال و بستر ثابت تشکیل شده است. در این پژوهش، مطابق قانون دوم ترمودینامیک به تحلیل اکسرژی و پارامترهای مؤثر بر تلفات و بازدهی اکسرژی این خشک کن ترکیبی پرداخته شده است. در آزمایش‌ها اثر سه دمای هوای ورودی و دو ضخامت ۶، ۸ سانتی متر در طبقه بالایی که بستر ثابت است، بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان داد تلفات اکسرژی طبقه بالایی کمتر و بازدهی اکسرژی آن بیشتر از طبقه پایین می‌باشد. همچنین افزایش ضخامت طبقه پایین سبب افزایش تلفات و کاهش بازدهی اکسرژی طبقه بالا می‌شود در حالی که افزایش ضخامت طبقه بالایی موجب کاهش تلفات و افزایش بازدهی طبقه پایین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اکسرژی، انرژی، بستر ثابت، بستر سیال، خشک کن.

KEY WORDS: Exergy, Energy, Fixed bed, Fluidized bed, Dryer.

مقدمه

مشخصی به کار مفید را تعیین کرد. شکل ۱ مفهوم اکسرژی را بیان می‌کند. که در آن انرژی برابر است با اکسرژی (انرژی در دسترس) به علاوه آنتروپی (انرژی خارج از دسترس).

طبق قانون دوم ترمودینامیک مجموع اکسرژی در جریان‌های خروجی از یک فرایند واقعی حالت پایدار همواره از مجموع اکسرژی در جریان‌های ورودی کمتر است. به عبارت دیگر در فرایندهای واقعی (غیرایده آل) همواره مقداری تلفات پتانسیل و کاهش توانایی انجام کار وجود دارد.

اما با همه این اوصاف، تحلیل اکسرژی که خود یک تحلیل ترمودینامیکی می‌باشد به تنهایی قادر به توضیح در مورد چگونگی اصلاح و بهینه سازی سامانه نیست، بلکه تنها نشان می‌دهد که چه میزان از فرایند فعلی به اتلاف انرژی منتهی شده و امکان بهبود آن وجود دارد.

یکی از روش‌هایی که برای تحلیل انرژی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است تحلیل اکسرژی می‌باشد. تحلیل انرژی به تنهایی باعث گمراهی و بی‌دقتی در رسیدن به وضع دلخواه می‌شود زیرا که مقدارهای انرژی طبق قانون اول ثابت است و فقط از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود. بنابراین نیاز به تعریف پارامتر دیگر که کیفیت انرژی را مشخص کند وجود دارد. قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که انرژی هم کمیت و هم کیفیت دارد و فرایندهای خود به خودی در جهت کاهش کیفیت انرژی اتفاق می‌افتند. تلاش برای کمی کردن کیفیت یا پتانسیل کار انرژی براساس قانون دوم منجر به تعریف ویژگی‌های آنتروپی و اکسرژی شده است. اکسرژی یا در دسترس پذیری خاصیتی است که با آن می‌توان قابلیت تبدیل مقدار معینی انرژی در حالت

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: vartehparvar@gmail.com

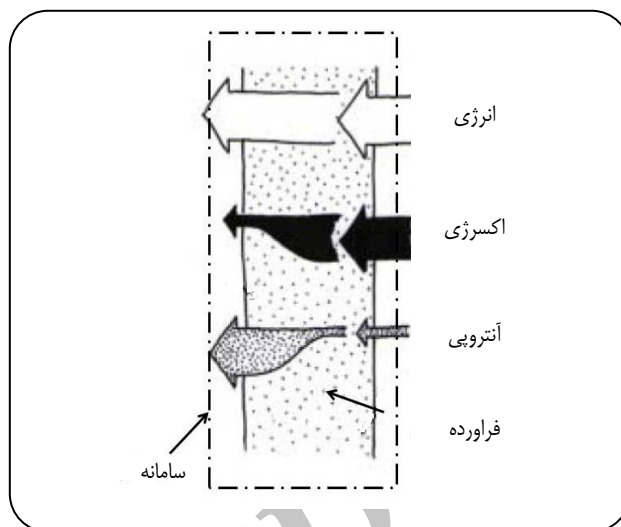
قرار داده و دید که با افزایش دما تلفات اکسرژی افزایش و بازده آن به تقریب ثابت است [۴].

سیلون و همکاران (۲۰۰۷ میلادی) اکسرژی خشک شدن الوار را با استفاده از پمپ گرمایی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که تلفات اکسرژی با گذشت زمان کاهش و بازده اکسرژی افزایش می‌یابد [۵].

آغباشلو و همکاران (۲۰۰۸ میلادی) به تحلیل اکسرژی سبب زمینی در خشک‌کن نیمه‌صنعتی لایه نازک مداوم پرداختند. نتیجه‌های پژوهش آنها نشان داد که تلفات اکسرژی با افزایش نرخ تغذیه فراورده، کاهش سرعت هوا و کاهش دما، کاهش می‌یابد و همچنین کاهش نرخ تغذیه فراورده، افزایش سرعت هوا و کاهش دما سبب افزایش بازده اکسرژی می‌شود [۶].

نازقلچی و همکاران (۲۰۱۰ میلادی) به تحلیل اکسرژی فرایند خشک شدن قطعه‌های هویج در ضخامت بستر و اندازه‌های گوناگون در خشک‌کن بستر سیال پرداختند. نتیجه‌های آنها نشان داد که با افزایش اندازه قطعه‌های هویج، کاهش عمق و کاهش دما تلفات اکسرژی کاهش می‌یابد. بازده اکسرژی نیز در بالاترین دما، کمترین عمق و بزرگترین اندازه قطعه‌های هویج بیشترین مقدار را داشته است [۷].

خشک کردن به شیوه‌های گوناگونی از جمله روش بسترسیال قابل انجام است. این روش در سال‌های اخیر به دلیل برتری‌هایی همچون یکنواختی در خشک کردن و انتقال جرم و گرمای بالا نسبت به سایر روش‌ها کاربرد بیشتری یافته است. ولی این سیال سازی سبب مصرف و افزایش تلفات بیشتر انرژی نیز می‌شود. زیرا برای سیال‌سازی نیاز به بالا بردن سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن است که این افزایش سرعت باعث می‌شود که هوا بدون اشباع شدن از رطوبت یعنی با داشتن پتانسیل رطوبت گیری از سامانه خشک‌کن خارج شود. بنابراین برای جبران تلفات انرژی در ایده‌های جدید این شیوه خشک کردن را با روش بستر ثابت ترکیب شده است تا هوای خروجی از محفظه بستر سیال به طور مستقیم برای خشک کردن فراورده یا مواد دیگر در طبقه بالایی مورد استفاده قرار بگیرد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر دماها و ضخامت‌های گوناگون فراورده گندم مرطوب در خشک‌کن ترکیبی بسترسیال - ثابت بر بازدهی و تلفات اکسرژی آن می‌باشد.

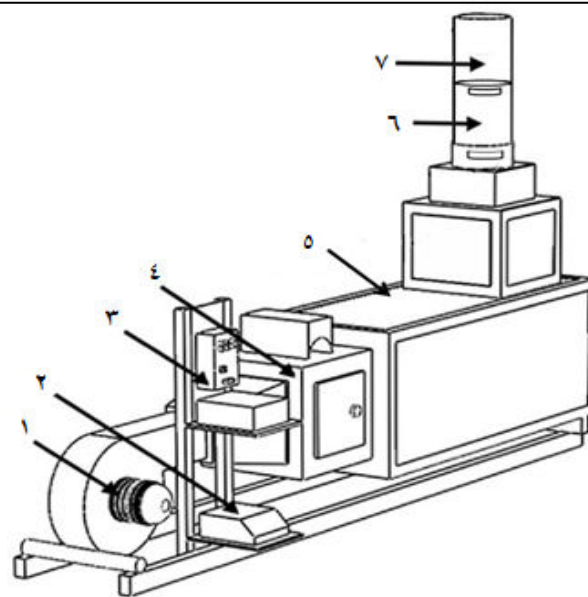


شکل ۱- مفهوم انرژی، اکسرژی و آنتروپی سامانه [۱].

با توجه به افزایش هزینه‌های مصرف انرژی در دنیای امروز، نیاز روز افزون به بهینه‌سازی فرایندها و سامانه‌های مورد استفاده در صنایع پیش از پیش وجود دارد. یکی از صنایع پر مصرف انرژی که نیاز به تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد صنعت خشک کردن مواد و فراورده‌های گوناگون از جمله فراورده‌های کشاورزی و غذایی است. خشک کردن فرایندی است که طی آن رطوبت مواد به کمک انتقال گرما و جرم گرفته می‌شود که یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است. به همین منظور مواد غذایی را تا رطوبت مشخصی خشک می‌کنند که از فساد آن جلوگیری شده و مدت نگهداری آن افزایش یابد.

درباره خشک‌کن طبقاتی پهلوانزاده و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی اثر تعداد سینی بر مصرف انرژی در خشک‌کن بسترسیال پرداختند که نتیجه‌ها نشان داد که مقدار ضریب انتقال جرم در سینی‌های بالاتر کمتر از ضریب انتقال جرم در طبقه پایین و با توان ۰/۲۸ شماره سینی‌ها نسبت معکوس و بازیافت انرژی با توان ۰/۸۲ تعداد سینی نسبت مستقیم دارد [۲]. در زمینه تحلیل اکسرژی خشک‌کن‌ها کارهای محدودی انجام شده است. میدیلی و همکاران (۲۰۰۳ میلادی) اکسرژی خشک کردن پسته در خشک‌کن خورشیدی را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که ساختار و محتوای رطوبتی عامل مهمی در افزایش مصرف انرژی و کاهش تلفات اکسرژی می‌باشد [۳].

آکینار (۲۰۰۴ میلادی) اکسرژی لازم برای خشک کردن ورقه‌های لفل قرمز را در یک خشک‌کن آزمایشگاهی مورد مطالعه



شکل ۲- خشک کن مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها: ۱- موتور و دمنده سانتریفیوژ، ۲- اینورتر، ۳- تابلوی کنترل، ۴- کوره، ۵- محفظه آرامش، ۶- محفظه خشک کن بستر سیال، ۷- محفظه خشک کن بستر ثابت.

بخش تجربی

چگونگی تهیه و آماده سازی فراورده

گندم رقم قدس از منطقه شهرستان پاکدشت تهیه شد. قبل از شروع آزمایش‌ها گندم به طور کامل از ناخالصی‌ها و دانه‌های شکسته جدا شد. با توجه به رطوبت اولیه که حدود ۸ الی ۹ درصد بر مبنای تر بود به ازای هر کیلوگرم حدود ۲۵۰ گرم آب به صورت اسپری کردن به آن اضافه شد. سپس در دمای ۴ درجه سلسیوس به مدت حداقل ۴ روز در بسته‌های نایلونی درون یخچال نگهداری شد. در این مدت هر روز از یخچال خارج و هم‌زده می شد تا رطوبت به‌طور یکنواخت توزیع شود. گندم نهایی آماده شده دارای رطوبت ۲۴-۲۵ درصد برپایه تر بود که با گذاشتن در داخل آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای 103 ± 1 درجه سلسیوس به دست آمد.

خشک کن آزمایشگاهی

در این پژوهش از یک خشک کن آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۲). خشک کن، شامل دمنده سانتریفیوژ، کوره، محفظه آرامش هوا، محفظه پلکسی گلاس، سید توری بستر ثابت، سامانه کنترل دور دمنده (اینورتر)، تابلوی برق و کنترل کننده‌ها، شامل ترموستات و ترموکوپل می‌باشد. چگونگی کار خشک کن

بدین صورت است که هوای مکیده شده از محیط، توسط دمنده از کوره که از تعدادی گرم کن الکتریکی تشکیل شده عبور می کند و دمای هوا توسط ترموستات تنظیم می‌شود. مقدار هوا و در نتیجه سرعت خروجی از محفظه خشک کن نیز توسط اینورتر تنظیم می‌شود. برای ثابت بودن دما با دقت ± 1 درجه سلسیوس تعداد گرم کن به طور ثابت و ولتاژی حدود ۲۵۰ وات در کنترل ترموستات در مدار قرار می‌گیرند. بعد از عبور هوا از محفظه آرامش هوا به زیر محفظه پلکسی گلاس وارد می‌شود. ارتفاع کلی محفظه پلکسی گلاس ۳۰ سانتی متر است که ۱۵ سانتی متر برای طبقه پایین به منظور بستر سیال و ۱۵ سانتی متر دیگر برای طبقه بالایی بستر ثابت، که به صورت سید توری در داخل پلکسی گلاس قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شده است. برای کاهش اثر محیط، بدنه خشک کن به طور کامل عایق شده است. نوع ترموکوپل از نوع K، سرعت هوای خروجی به وسیله سرعت سنج هوا مدل Anemometer, AM-۴۲۰۶ و وزن کردن فراورده با ترازوی دیجیتال انجام شده است.

روش انجام آزمایش‌ها

در شروع آزمایش دو طبقه محفظه خشک کن از گندم مرطوب تا ضخامت مشخص پر شده، سپس به روی خشک کن منتقل می‌شد.

ρ_a چگالی هوا (kg/m^3)، v_a سرعت هوا (m/s)، A_{dc} سطح مقطع محفظه خشک کن (m^2).

برای گرمای ویژه هم داریم [۴، ۷، ۸]:

$$C_{pa} = 1.004 + 1.88w \quad (3)$$

عدد ۱.۰۰۴ گرمای ویژه هوای بدون رطوبت می‌باشد. مقدار نسبت رطوبت ورودی و نسبت رطوبت خروجی هر کدام به ترتیب از معادله‌های (۴) و (۶) به دست می‌آیند:

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}} \quad (4)$$

ϕ رطوبت نسبی هوا، P فشار هوا (kPa)، P_{vs} فشار اشباع هوا می‌باشد.

و برای به دست آوردن \dot{m}_v هم از معادله (۵) استفاده شده است: [۴، ۷].

$$\dot{m}_v = \frac{(W_t - W_{t+\Delta t})}{\Delta t} \quad (5)$$

$$w_{ao} = w_{ai} + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad (6)$$

W وزن فراورده (kg) و t زمان (min) می‌باشد

اکسرژی هوای ورودی و خروجی از طریق قانون دوم ترمودینامیک قابل محاسبه است. روش اساسی برای تحلیل اکسرژی محفظه خشک کن، محاسبه اکسرژی در شرایط پایدار می‌باشد. شکل کلی معادله اکسرژی قابل استفاده نیز که توسط پژوهشگران زیادی به کار برده شده است، به صورت زیر می‌باشد [۴، ۵، ۷، ۸].

$$Ex = \dot{m}_a C_{pa} \left[(T - T_e) - T_e \ln \frac{T}{T_e} \right] \quad (7)$$

معادله (۸) نیز برای محاسبه‌های تلفات اکسرژی استفاده شده است.

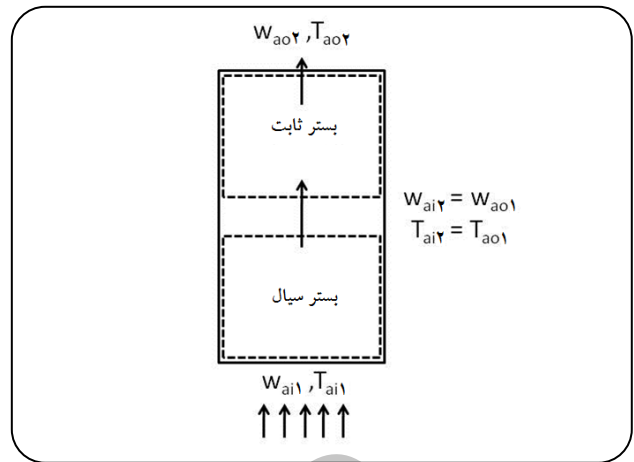
$$Ex_1 = \sum Ex_i - \sum Ex_o \quad (8)$$

که $\sum Ex_1$ مجموع اکسرژی تلف شده (kJ/s)، $\sum Ex_i$ مجموع اکسرژی ورودی (kJ/s) و $\sum Ex_o$ مجموع اکسرژی خروجی می‌باشد. بازده اکسرژی نیز بدین صورت به دست می‌آید:

$$Ex_{eff} = \frac{\sum Ex_i - \sum Ex_o}{\sum Ex_i} = \frac{Ex_o}{Ex_i} \quad (9)$$

(۱) Down

(۲) Up



شکل ۳- شمای محفظه خشک کن.

برای رسیدن به کمترین سرعت سیال‌سازی، سرعت دمنده افزایش داده شد تا جایی که مواد طبقه پایین به حالت کمترین سیالیت برسند، بدون اینکه در مواد طبقه بالا سیال‌سازی اتفاق بیفتد. آزمایش‌ها را در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ سانتی متر برای هر دو طبقه به ترتیب در ضخامت‌های $4_{dw}-8_{up}$ ، $6_{dw}-8_{up}$ ، $8_{dw}-8_{up}$ و $4_{dw}-6_{up}$ انجام شد که عدد اول از سمت چپ ضخامت طبقه پایین^(۱) و عدد سمت راست ضخامت طبقه بالایی^(۲) می‌باشد. در شکل شماره ۳ شمای محفظه خشک کن و پارامترهای ورودی و خروجی به هر طبقه مشخص شده است.

بخش نظری

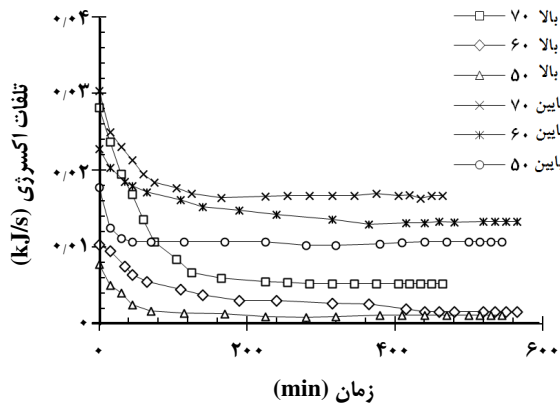
با توجه به جنس محفظه که از پلکسی گلاس به ضخامت ۰/۵ سانتی متر است تلفات گرمایی ناچیز بوده و همچنین با عایق در نظر گرفتن دیواره، سامانه بی‌دررو^(۳) فرض شده است. طبق قانون اول ترمودینامیک در سامانه جرم کنترل داریم:

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} = \dot{m}_a \quad (1)$$

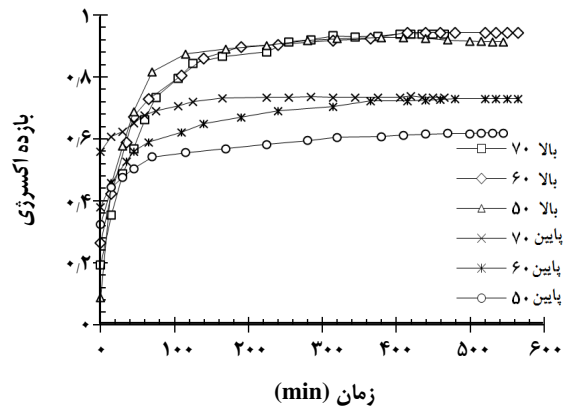
\dot{m}_a شدت جریان جرمی هوا (kg/s) و \dot{m}_{ao} و \dot{m}_{ai} شدت جریان جرمی هوا به ترتیب در ورودی و خروجی محفظه خشک کن می‌باشند. که مقدار شدت جریان هوا از معادله (۲) به دست آمده است:

$$\dot{m}_a = \rho_a v_a A_{dc} \quad (2)$$

(۳) Adiabatic



شکل ۴- اثر دما بر تلفات و بازده اکسرژی دو طبقه بستر سیال و بستر ثابت.



نشان می‌دهد. اولین نتیجه‌ای که از مقایسه شکل‌ها به دست می‌آید این است که تلفات اکسرژی مستقل از نوع بستر می‌باشد. مقایسه دو طبقه بیانگر آن است که در مدت زمان خشک شدن تلفات اکسرژی طبقه بالایی مقدارهای کمتری نسبت به طبقه پایین دارد که دلیل آن از دست دادن گرمای هوای ورودی به طبقه بالایی بر اثر عبور از طبقه پایین می‌باشد. تغییر تلفات اکسرژی طبقه پایین کمتر از طبقه بالایی می‌باشد. برای مثال در ضخامت $4_{dw}-8_{up}$ تلفات اکسرژی طبقه بالایی از 0.0284 kJ/s شروع و با کاهش 0.0222 kJ/s به مقدار 0.00623 kJ/s در انتهای فرایند رسید، ولی در طبقه پایین از مقدار 0.0287 kJ/s شروع و با کاهش 0.0119 kJ/s به مقدار 0.016 kJ/s رسید. دلیل آن را با توجه به میزان اولیه و نهایی رطوبت فرآورده که یکسان بوده است، می‌توان نتیجه گرفت بستر سیال به دلیل ماهیت سیال تلفات اکسرژی بالاتری دارد. با افزایش ضخامت تلفات اکسرژی نیز افزایش می‌یابد هرچند که نظم خاصی ندارد، که به دلیل تأثیر ضخامت هر طبقه بر طبقه دیگر می‌باشد.

شکل ۶ بیانگر اثر ضخامت‌های گوناگون روی بازده اکسرژی، در دمای 70°C سلسیوس درجه می‌باشد. شکل سمت چپ بازده اکسرژی را برای طبقه بستر سیال و شکل سمت راست برای بستر ثابت را نشان می‌دهد. بازده اکسرژی طبقه بالایی بیشتر از طبقه پایینی می‌باشد. نکته چشمگیر دیگر این است که در طبقه بالایی بازده از نزدیک به صفر شده شروع شده و افزایش می‌یابد ولی در طبقه پایینی به طور متوسط از 0.22 شروع می‌شود. پایین بودن دما در شروع آزمایش که طبق روابط 7 و 9 سبب کوچک شدن مقدار بازده اکسرژی می‌شود ولی با گذشت زمان دمای خروجی افزایش یافته

شایان گفتن است $Ex_{i,r} = Ex_{o,i}$ می‌باشد

نتیجه‌ها و بحث

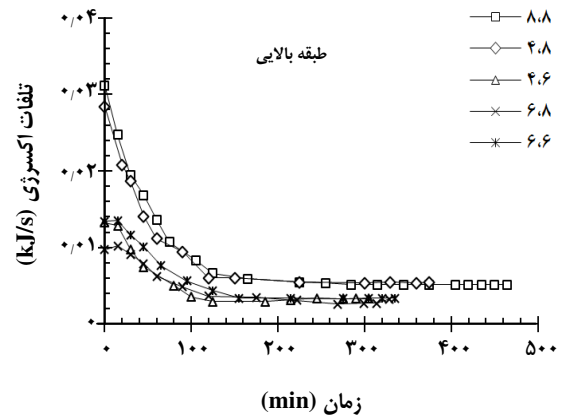
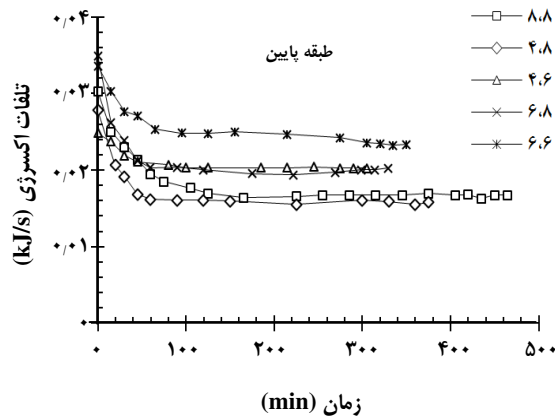
روند کاهش تلفات اکسرژی و افزایش بازده اکسرژی همانند نتیجه‌های به دست آمده از پژوهش‌های دیگر برای بیشتر شرایط فرآورده‌ها می‌باشد [۷، ۴]. زیرا سرعت از دست دادن رطوبت با تلفات اکسرژی رابطه مستقیم و با بازدهی اکسرژی رابطه عکس دارد. برای درک بهتر اثر هر پارامتر، به طور جزئی تر در ادامه به بررسی پارامترهای مورد آزمایش پرداخته می‌شود.

اثر دماهای گوناگون بر تلفات و بازده اکسرژی

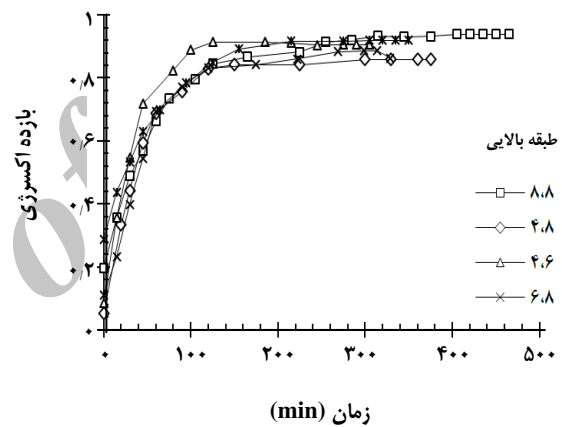
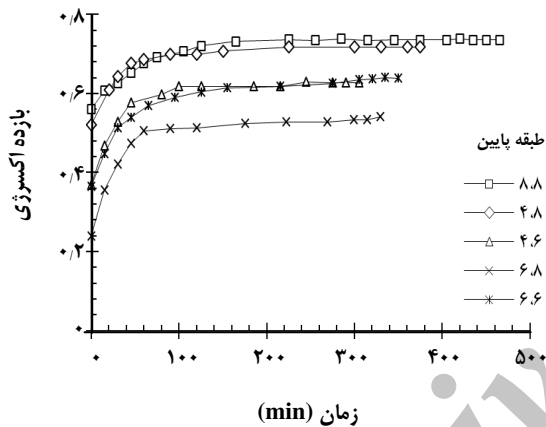
شکل ۴ اثر دماهای گوناگون را بر تلفات و بازده اکسرژی هر دو طبقه بالایی و پایینی در ضخامت $8_{dw}-8_{up}$ سانتی‌متری نشان می‌دهد. تلفات اکسرژی در هر دو طبقه با افزایش دما از 50 به 70 درجه سلسیوس، افزایش می‌یابد. بازده اکسرژی هر دو طبقه با افزایش دما افزایش می‌یابد ولی در طبقه بالایی مقدارهای نزدیک به هم می‌باشد که به دلیل نوع بستر می‌تواند باشد. نازقلیچی و همکاران (۲۰۱۰ میلادی) نیز نتیجه‌های مشابه اثر مستقیم دما هم بر تلفات و هم بازده اکسرژی برای خشک کردن هویج در خشک کن بستر سیال را گزارش کرده‌اند.

اثر ضخامت‌های گوناگون دو طبقه در دمای ثابت

شکل ۵ بیانگر اثر ضخامت‌های گوناگون روی تلفات اکسرژی، در دمای 70°C درجه سلسیوس می‌باشد. شکل سمت چپ تلفات اکسرژی را برای طبقه بستر سیال و شکل سمت راست برای بستر ثابت را



شکل ۵ - اثر ضخامت‌های گوناگون طبقه بالایی و پایینی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس بر تلفات اکسرژی.



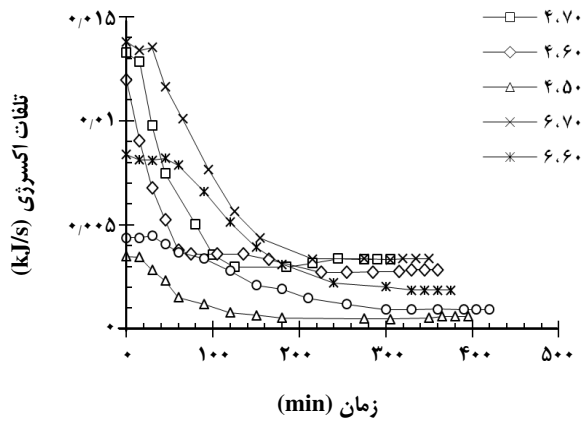
شکل ۶ - اثر ضخامت‌های گوناگون طبقه بالایی و پایینی در دمای ۷۰ سلسیوس درجه بر بازده اکسرژی.

اثر ضخامت بستر ثابت بر تلفات و بازده اکسرژی بستریال در دمای گوناگون و ضخامت معین بستریال

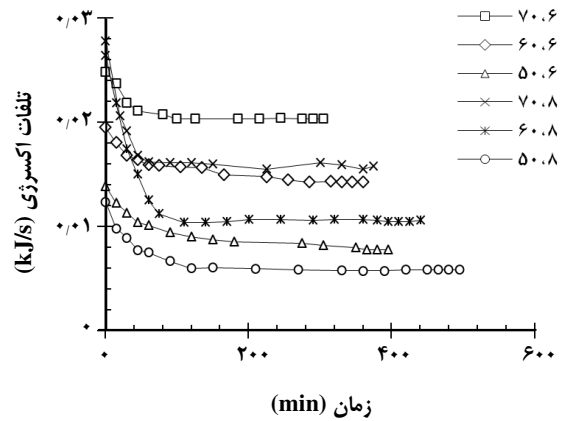
شکل ۷ تلفات اکسرژی طبقه پایین را در ضخامت ثابت ۴ سانتی‌متری طبقه پایین و در دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه بالایی نشان می‌دهد. برای طبقه پایین بیشترین تلفات اکسرژی در دمای ۷۰ درجه و ضخامت ۶ سانتی متری طبقه بالایی به دست آمده است. نکته مهم این است که در یک دمای معین، افزایش ضخامت طبقه بالایی از ۶ به ۸ سانتی متر سبب کاهش تلفات اکسرژی طبقه پایین شده است. شکل ۸ نیز اثر دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه بالایی را در ضخامت ثابت ۴ سانتی‌متری طبقه پایین بر روی بازده اکسرژی طبقه پایین نشان می‌دهد. بیشترین بازده اکسرژی در ضخامت طبقه بالایی ۸ سانتی‌متر

و به دمای ورودی نزدیکتر می‌شود که سبب افزایش تناسب در معادله (۹) برای طبقه فوقانی به نسبت همان تناسب در معادله (۹) برای طبقه پایین می‌شود.

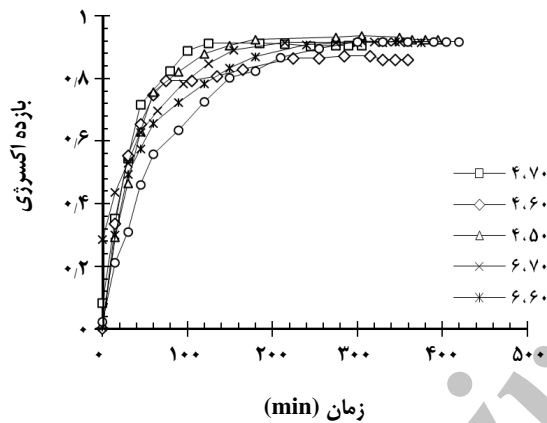
ضخامت $\lambda_{dw} - \lambda_{up}$ بیشترین بازدهی اکسرژی برای طبقه پایین با حدود ۷۰ درصد را دارند. برای طبقه بالایی نیز بازده اکسرژی برای ضخامت‌های گوناگون نزدیک به هم است که بیشترین مقدار در حدود ۰/۹ می‌باشد. نکته دیگری که از مقایسه بازدهی دو طبقه به دست می‌آید این است که در طبقه پایین تغییر بازدهی با حدود ۰/۳۵ تغییر از کمترین مقدار خود در شروع خشک شدن به بیشینه مقدار ثابت خود در پایان زمان خشک شدن رسیده است در حالی که در طبقه بالایی تغییر بازدهی زیاد است که به‌طور متوسط حدود ۰/۷ تا ۰/۹ می‌باشد.



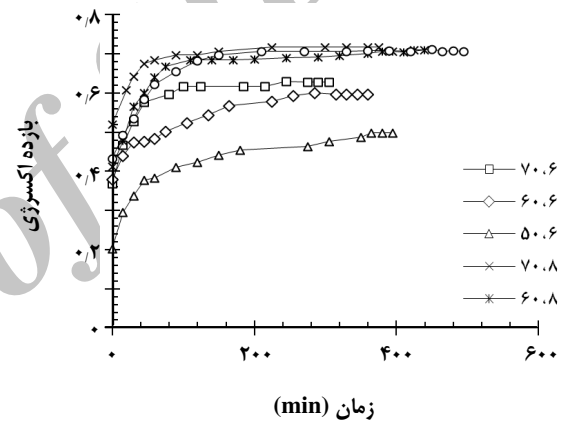
شکل ۹- تلفات اکسرژی طبقه بالایی در ضخامت ثابت ۶ سانتی متری طبقه بالایی و در دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه پایین.



شکل ۷- تلفات اکسرژی طبقه پایین در ضخامت ثابت ۴ سانتی متری طبقه پایین و در دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه فوقانی.



شکل ۱۰- بازده اکسرژی طبقه بالایی در ضخامت ثابت ۶ سانتی متری طبقه بالایی و در دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه پایین.



شکل ۸- بازده اکسرژی طبقه پایین در ضخامت ثابت ۴ سانتی متری طبقه پایین و در دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه فوقانی.

مستقل از طبقه پایین نمی‌باشد همان‌گونه که در قسمت قبل نیز بیان شد که طبقه پایین مستقل از طبقه بالایی نمی‌باشد. در ضخامت‌های زیاد طبقه پایین و یا دمای ۷۰ درجه به دلیل بالا بودن رطوبت از دست داده شده، تلفات اکسرژی طبقه بالایی در لحظه‌های آغازین ثابت می‌ماند. از دست دادن رطوبت منجر به زیاد شدن نسبت رطوبت شده، که طبق معادله‌های (۳) و (۷) از طریق گرمای ویژه تأثیر مستقیم بر اکسرژی دارد.

شکل ۱۰ همچنین اثر دماها و ضخامت‌های گوناگون طبقه پایین را در ضخامت ثابت ۶ سانتی متری طبقه بالایی بر روی بازده اکسرژی طبقه بالایی نشان می‌دهد. از بررسی منحنی‌ها نتیجه گرفته می‌شود که در دمای ثابت افزایش ضخامت طبقه پایین سبب کاهش بازده طبقه بالایی شده است. کمترین بازدهی اکسرژی

و دمای ۷۰ درجه اتفاق افتاده است. دیده می‌شود که در دمای ثابت افزایش ضخامت طبقه بالایی سبب افزایش بازده طبقه پایین شده است

اثر ضخامت بستر سیال بر تلفات و بازده اکسرژی بستر ثابت در دمای گوناگون و ضخامت معین بستر ثابت

شکل ۹ تلفات اکسرژی طبقه بالایی را در ضخامت ثابت ۶ سانتی متری طبقه بالایی و در دماها و ضخامت‌های گوناگون بستر سیال نشان می‌دهد. بیشترین تلفات طبقه بالایی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۶ سانتی متری دیده می‌شود. نکته شایان توجه این است که افزایش ضخامت طبقه پایین سبب افزایش تلفات طبقه بالایی شده است. به عبارت دیگر طبقه بالایی

v	سرعت هوا، m/s	در کمترین دما، ۵۰ درجه و ضخامت ۶ سانتی متری بیشترین ضخامت به دست آمده است.
A	سطح مقطع محفظه خشک کن، m^2	
C	گرمای ویژه	
ϕ	رطوبت نسبی هوا	نتیجه گیری
P	فشار هوا، kPa	۱- فرایند تغییر تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی مستقل از نوع بستر خشک کن در حال خشک شدن است.
W	وزن فراورده، kg	۲- تلفات اکسرژی طبقه بالایی کمتر و بازده اکسرژی آن بیشتر از طبقه پایین می باشد.
t	زمان، min	۳- افزایش ضخامت طبقه بالایی سبب کاهش تلفات اکسرژی و افزایش بازده اکسرژی طبقه پایین می شود.
Ex	اکسرژی هوا، kJ/s	۴- افزایش ضخامت طبقه پایین سبب افزایش تلفات اکسرژی و کاهش بازده اکسرژی طبقه بالایی می شود.
T	دما، K	۵- افزایش دما باعث افزایش تلفات هر دو طبقه بستر سیال و بستر ثابت می شود.
	زیر نویس ها	۶- افزایش دما باعث افزایش بازدهی اکسرژی هر دو طبقه شده ولی بر بستر سیال اثر بارزتری دارد.
a	هوا	
e	محیط	
vs	اشباع (سیر شده)	
p	فراورده	
i	ورودی	
o	خروجی	
dc	محفظه خشک کن	

نمادها

شدت جریان جرمی هوا، kg/s
چگالی هوا، kg/m^3

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۱۳

مراجع

- [1] Cengel A. Y., Boles M.A., "Thermodynamics an Engineering Approach", 5th ed., p.442, McGraw-Hill College, Boston, (2006).
- [۲] پهلوانزاده، ح؛ قائم مقامی، ف، تعیین اثر تعداد سینی های توزیع کننده ماده خشک شونده بر میزان بهینه سازی مصرف انرژی در خشک کن های بسترسیال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۲۸، ص. ۸۱ (۱۳۸۸).
- [3] Midilli A., Kucuk H., Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio, *Energy*, p.539 (2003).
- [4] Akpınar E.K., Energy and Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Slices in A Convective Type Dryer, *International Communication in Heat And Mass Transfer*, **31**, p. 1165 (2004).
- [5] Ceylan I., Aktas M., Dogan H., Energy and Exergy Analysis of Timber Dryer Assisted Heat Pump, *Applied Thermal Engineering*, **27**, p. 216 (2007).
- [6] Aghbashlo M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini A., Energy and Exergy Analyses of Thin-Layer Drying of Potato Slices in a Semi-Industrial Continuous Band Dryer, *Drying Technology*, **26**(12), p. 1501 (2008).

- [7] Nazghelichi T., Kianmehr M. K., Aghbashlo M., Thermodynamic Analysis of Fluidized Bed Drying of Carrot Cubes, *Energy*, **35**(1), p. 4679 (2010).
- [8] Corzo O., Bracho N., Vasquez, A., Pereira, A., Energy and Exergy Analysis of Thin Layer Drying of Coroba Slices, *Journal of Food Engineering*, **86**, p.151 (2008).

Archive of SID