



تحلیل اثر ترمودینامیکی برخی متغیرهای خشک شدن در یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی

طیب نازقلیچی^۱، محمد حسین کیانمهر^۲، سیدرضا حسن‌بیگی^۳، مسعود عسکری^۱

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار و استادیار ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل انرژی و اکسرژی یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی برای هویج‌های مکعب شده ارائه شده است. خشک کردن در دماهای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، عمق بستر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر و هویج‌های مکعبی شکل به ابعاد ۴، ۷ و ۱۰ میلی‌متر انجام شد. اثر متغیرهای خشک شدن روی مصرف انرژی (energy utilization)، نسبت مصرف انرژی (energy utilization ratio)، اتلاف اکسرژی (exergy loss)، و بازده اکسرژی (exergy efficiency) بررسی شد. مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی به ترتیب از ۰/۱۰۵ تا ۱/۹۴۹ و ۰/۰۷۴ تا ۰/۴۸۶ کیلوژول بر ثانیه متغیر بودند. تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی به ترتیب در بازه ۰/۲۰۶ تا ۱/۶۱۲ و ۰/۱۰۳ تا ۰/۷۰۷ کیلوژول بر ثانیه متغیر بودند. نتایج نشان می‌دهد که دمای هوای ورودی بالاتر، بستر عمیق‌تر و هویج‌های با قطر کوچکتر مصرف انرژی را افزایش و تلفات انرژی را از خروجی هوا کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، اکسرژی (exergy)، خشک‌کن بستر سیال، مکعب‌های هویج

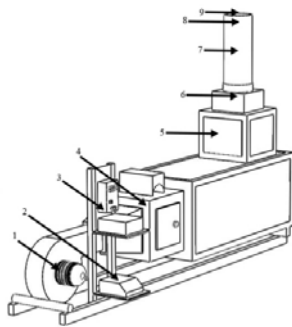
مقدمه

در سالهای اخیر خشک کردن مواد غذایی به منظور نگهداری آن برای مصرف خشک و نیز به عنوان عملیات حد واسط در پروسه های صنایع غذایی بطور گسترده ای کاربرد دارد (Smith، ۲۰۰۷). میوه ها و سبزیجات تازه بواسطه افزایش یافتن محتوای رطوبتی، بطور جدی در معرض فساد قرار دارند. خشک کردن بهترین راه برای به حداقل رساندن ضایعات آنها می باشد و نیز بواسطه کمتر شدن وزن و حجم محصولات خشک، بسته بندی و حمل و نقل آن آسانتر و ارزانتر می شود (Stanislawski، ۲۰۰۵). خشک کنهای بستر سیال بطور وسیع برای خشک کردن ذرات مرطوب و مواد دانه ای که قابلیت سیال سازی را دارند و حتی برخی محلولها و سوسپانسیونها کاربرد دارند. استفاده از بسترهای سیال مزایای مهمی چون اختلاط خوب مواد، ضرایب انتقال جرم و حرارت زیاد و همچنین انتقال آسان مواد را به همراه دارد (Mujumdar، ۲۰۰۶).

خشک کردن در عمل فرآیندی است که انرژی ورودی بسیاری را به دلیل وجود گرمای نهان تبخیر آب و بازده نسبتاً کم خشک‌کن‌های صنعتی، نیاز دارد (Syahrul و همکاران، ۲۰۰۲). خشک کردن مواد حدود ده درصد از کل انرژی مصرفی در صنایع غذایی را به خود اختصاص می‌دهد (Smith، ۲۰۰۷). مصرف مقادیر زیاد انرژی در صنعت خشک کردن مواد غذایی، آنرا به پر مصرف‌ترین عملیات و با اهمیت زیاد صنعتی تبدیل کرده است (Aghbashlo و همکاران ۲۰۰۹). بنابراین یکی از مهمترین چالشها در صنایع تولید خشکبار، کاهش هزینه منابع انرژی برای تولید محصولات خشک با کیفیت مطلوب می‌باشد. از این رو تحلیل موثر ترمودینامیکی برای خشک‌کنهای بستر سیال، با هدف صرفه جویی در مصرف انرژی و بهینه سازی متغیرهای فرآیند، لازم و ضروری می‌باشد (Syahrul و همکاران، ۲۰۰۲). اکسرژی در واقع انرژی قابل دسترس در نقاط مختلف یک سیستم را ارزیابی می‌کند. در طراحی یک سیستم، روش تحلیل اکسرژی اطلاعات ارزنده‌ای در انتخاب مناسب اجزای طراحی و روشهای کاربرد را فراهم می‌آورد. این اطلاعات در تعیین طرح و هزینه عملیات، ذخیره انرژی، قابلیت تغییر سوخت و آلودگی نقش خیلی موثرتری دارند (Akpinar، ۲۰۰۴، Akpinar و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶، Corzo و همکاران، ۲۰۰۸، Dincer و Sahin، ۲۰۰۴، Midilli و Kucuk، ۲۰۰۳). اخیراً مطالعات متعددی در زمینه تحلیل انرژی و اکسرژی در خشک کردن مواد غذایی انجام پذیرفته است (Aghbashlo و همکاران، ۲۰۰۸، Akbulut و Durmus، ۲۰۱۰، Celma و Cuadros، ۲۰۰۹). مرور و کنکاش در این مطالعات نشان داد که یافته‌های مناسب و کافی در زمینه تاثیر شرایط خشک شدن بر تحلیل انرژی و اکسرژی در خشک‌کن بستر سیال سبزیجات و میوه‌ها در دسترس نیست. هدف عمده تحقیق حاضر تحلیل ترمودینامیکی خشک شدن مکعبهای هویج در خشک‌کن بستر سیال تحت شرایط متفاوتی از دمای هوای خشک‌کننده (T)، عمق بستر اولیه (BD) و اندازه ذرات (CS) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

هویج‌های تازه برداشت شده (*Daucus carota L*) از فروشگاه محلی خریداری و در آزمایشگاه در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. در ابتدای هر آزمایش هویج‌ها شسته و پوست کنده شده و به صورت دستی به مکعب‌هایی به ابعاد ۴×۴×۴، ۷×۷×۷ و ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر بریده شدند. رطوبت اولیه هویج‌ها با خشک کردن ۵۰ گرم نمونه در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تعیین شد. خشک کردن در خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران انجام شد.



شکل ۱- طرح کلی دستگاه آزمایشی

۱. فن ۲. اینودتر ۳. برد کنترل گرم‌کن‌ها ۴. گرم‌کن‌ها ۵. محفظه ۶ و ۸. ترموکوپلها ۷. محفظه استوانه‌ای سیال‌سازی ۹. بادسنج

محفظه استوانه‌ای شکل سیال‌سازی، از جنس پلکسی‌گلاس به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و به ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر بود. جریان هوای مورد نیاز توسط یک دمنده سانتریفوژ از هوای محیط مکش می‌شد. برای تامین نرخ جریان هوای مورد نیاز برای سیال‌سازی مکعب‌های هویج، سرعت دمنده بوسیله یک اینورتر که مستقیماً به موتور دمنده متصل می‌شد، قابل تغییر بود. خشک‌کن دارای یک کنترل‌گر دمای اتوماتیک با دقت $\pm 1^\circ\text{C}$ بود. سرعت جریان هوا با استفاده از یک بادسنج (PROVA AVM-07 (TES, Co, Taiwan) با دقت ۰/۰۵ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. وزن کردن نمونه حین آزمایش در هر پنج دقیقه بوسیله یک ترازو (MAHAK 332A, Iran) با دقت ۰/۰۱ گرم انجام گرفت. در حین آزمایش سرعت جریان هوا، دمای محیط، رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی و خروجی خشک‌کن در هر ۱۵۰ ثانیه ثبت گردید. قبل از آزمایش، محفظه خشک‌کن با هویج‌های مکعب شده پر شد تا به عمق بستر مورد نظر برسد و سپس نمونه‌ها برای تعیین وزن اولیه از سیلندر خارج شدند. بعد از اینکه خشک‌کن به حالت تعادل دما و سرعت سیال‌سازی رسید، هویج‌ها درون محفظه خشک‌کن قرار داده شده و در آنجا خشک شدند. آزمایش در دماهای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و عمق اولیه بستر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر و هویج‌های مکعب شده به ابعاد $4 \times 4 \times 4$ ، $7 \times 7 \times 7$ و $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر انجام شد. هر کدام از تیمارها سه بار تکرار شد.

تحلیل انرژی

مصرف انرژی (Eu) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر بیان می‌شود (Syahrul و همکاران، ۲۰۰۳).

$$Eu = \dot{m}_{da} (h_{dai} - h_{dao}) \quad (1)$$

دبی جرمی هوا (\dot{m}_{da}) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Aghbashlo و همکاران، ۲۰۰۸).

$$\dot{m}_{da} = \rho_a V_a A_{dc} \quad (2)$$

آنتالپی هوای خشک‌کن را می‌توان به صورت زیر نوشت (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸).

$$h_{da} = C_{pda} (T - T_\infty) + h_{fg} w \quad (3)$$

گرمای ویژه هوای ورودی و خروجی (C_{pda}) از فرمول زیر به دست می‌آید (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸).

$$C_{pda} = 1.004 + 1.88w \quad (4)$$

در حین تحلیل انرژی و اکسرژی فرایند خشک شدن هویج‌ها، رابطه زیر برای تبدیل رطوبت نسبی به نسبت رطوبت هوا (kg water/kg dry air) استفاده شد (Topic، ۱۹۹۵).

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (5)$$

نسبت رطوبت هوای ورودی و خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود (Akpinar، ۲۰۰۴).

$$w_{dao} = w_{dai} + \frac{DR}{\dot{m}_{da}} \quad (6)$$

(DR) از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$DR = \frac{W_t - W_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (7)$$

نرخ انتقال حرارت ناشی از تغییر فاز محتوای رطوبتی هویج‌ها برابر است با (Syahrul و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\dot{Q}_{evap} = \frac{DR}{\dot{m}_{da}} \times h_{fg} \quad (8)$$

نسبت انرژی مصرفی محفظه خشک‌کن (EUR) از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸).

$$EUR = \frac{\dot{m}_{da}(h_{dai} - h_{dao})}{\dot{m}_{da}(h_{dai} - h_{dae})} \quad (9)$$

تحلیل اکسرژی

اکسرژی کل ورودی و خروجی و نیز اتلاف اکسرژی با تحلیل قانون دوم ترمودینامیک تعیین شد. شیوه اصلی برای تحلیل اکسرژی محفظه خشک‌کن، محاسبه مقادیر اکسرژی در نقاط پایدار و تعیین علت تغییر اکسرژی برای فرآیند بود. بدین منظور فرم کلی معادله اکسرژی کاربردی برای سیستم با جریان ثابت به کار گرفته شد (Midilli و Kucuk، ۲۰۰۳).

$$Ex = \dot{m}_{da} C_{pda} [(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T}{T_{\infty}}] \quad (10)$$

اکسرژی تلف شده در محفظه خشک‌کن به صورت زیر محاسبه شد (Akpınar، ۲۰۰۴).

$$Ex_i = Ex_f - Ex_o \quad (11)$$

بازده اکسرژی می‌تواند به صورت اکسرژی مصرف شده برای خشک کردن محصول نسبت به اکسرژی هوای خشک کننده در سیستم خشک‌کن، تعریف شود (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Ex_{eff} = \frac{Ex_i - Ex_l}{Ex_i} = 1 - \frac{Ex_l}{Ex_i} \quad (12)$$

در این تحقیق دمای محیط و رطوبت نسبی هوا به ترتیب $T_{\infty} = 25^{\circ}C$ و $\phi = 20\%$ بودند.

نتایج و بحث

تحلیل انرژی

مقدار رطوبت اولیه هویج‌ها $89/3 \pm 0/36\%$ بود،

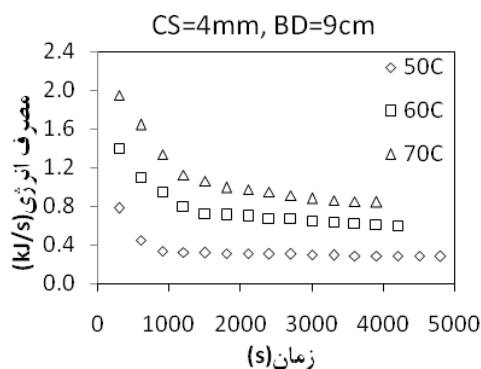
(کیلوگرم ماده خشک/کیلوگرم آب). سرعت سیال‌سازی بدست آمده برای هویج‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: سرعت سیال‌سازی هویج در اندازه مکعب‌ها و عمق بسترهای مختلف

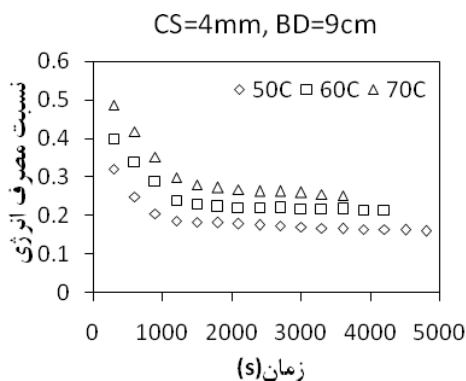
شرایط آزمایش	BD ۳۰mm	BD ۶۰mm	BD ۹۰mm
CS=۴×۴×۴ mm	۲.۶m/s	۳.۵m/s	۵m/s
CS=۷×۷×۷ mm	۲.۸m/s	۳.۷۵m/s	۵.۵m/s
CS=۱۰×۱۰×۱۰ mm	۳m/s	۴m/s	۶m/s

تحلیل انرژی خشک شدن بستر سیال هویج با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایشات انجام شد. منحنی‌های مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای هویج‌های با ابعاد (CS) و عمق اولیه بستر (BD) که به ترتیب در دمای هوای ورودی ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس قرار بودند، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. بیشترین مقدار مصرف انرژی ۱/۹۴۹ کیلو-ژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۴×۴×۴، عمق اولیه بستر ۹۰ میلی‌متر و در دمای هوای ۷۰ درجه بود. کمترین مقدار

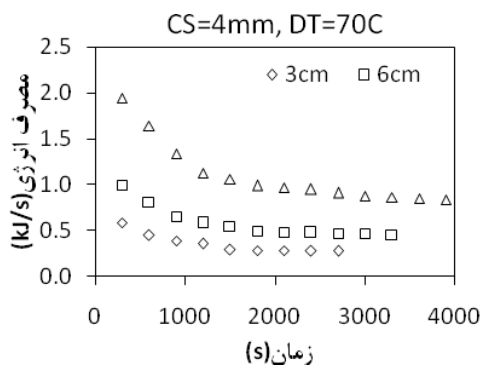
مصرف انرژی ۰/۱۰۵ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰، عمق اولیه بستر ۳۰ میلی‌متر و دمای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. بیشترین مقدار نسبت مصرف انرژی ۰/۴۶۸ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۴×۴×۴، عمق اولیه بستر ۹۰ میلی‌متر و دمای هوای ورودی ۷۰ درجه سلسیوس بود. کمترین مقدار نسبت مصرف انرژی ۰/۰۷۴ کیلو-ژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰، عمق اولیه بستر ۳۰ میلی‌متر و دمای هوای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی با افزایش زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی در ابتدای آزمایش به علت سرعت زیاد از دست رفتن رطوبت هویج‌ها، زیاد بود و به علت از دست رفتن کامل رطوبت باقیمانده که با سرعت کندتر اتفاق می‌افتد، به سرعت کاهش یافت. با افزایش دمای هوای خشک‌کن مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش یافت، زیرا دماهای بالاتر باعث کاهش بیشتر مقدار رطوبت می‌شود. به عبارت دیگر دماهای بالاتر باعث انتقال بیشتر حرارت و جرم می‌شود و در نتیجه مقدار رطوبت بیشتری از هویج‌ها گرفته می‌شود. یافته‌های مشابهی توسط چندین محقق که روی تاثیر دمای هوا بر روی مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی مطالعه کرده‌اند، گزارش شده است (Akpınar، ۲۰۰۴، Corzo و همکاران، ۲۰۰۸، Midilli و Kucuk، ۲۰۰۳).



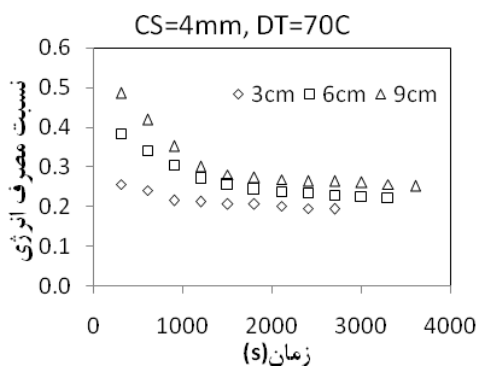
شکل ۲- تاثیر دما بر روی مصرف انرژی



شکل ۳- تاثیر دما بر روی نسبت مصرف انرژی

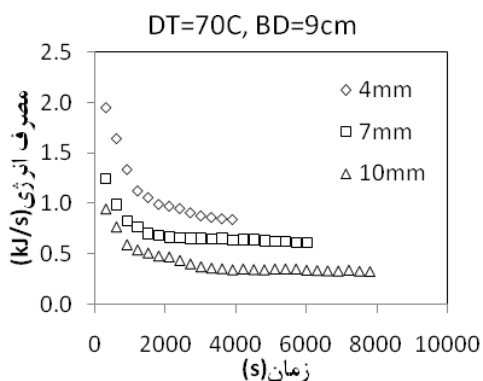


شکل ۴- تاثیر عمق بستر بر روی مصرف انرژی

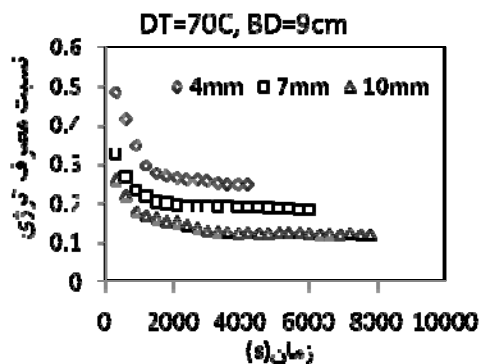


شکل ۵- تاثیر عمق بستر بر روی نسبت مصرف انرژی

منحنی‌های مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای هویج‌های با عمق اولیه بستر و دمای هوای ثابت که تحت تاثیر ابعاد مکعب‌های هویج از ۴ تا ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. با کاهش اندازه مکعب‌ها، مساحت هویج‌های در تماس با هوای سیستم افزایش یافته و در نتیجه انتقال جرم و حرارت افزایش می‌یابد. بنابراین بیشترین انرژی فراهم شده برای محفظه خشک‌کن برای تبخیر رطوبت از هویج مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

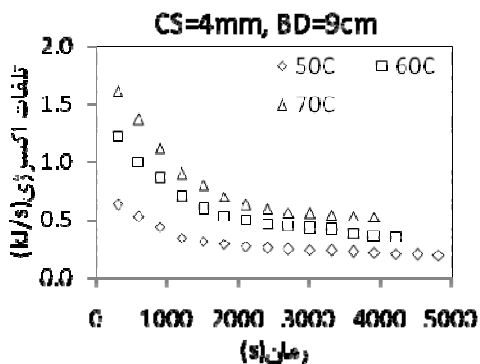


شکل ۶- تاثیر اندازه مکعب بر روی مصرف انرژی



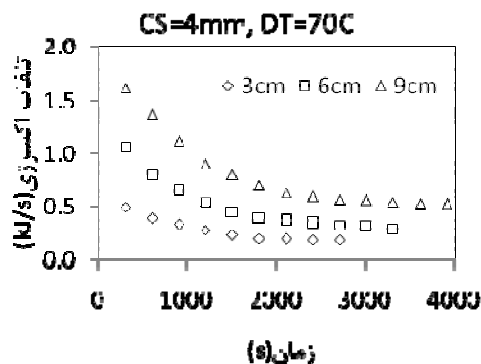
شکل ۷- تاثیر اندازه مکعب بر روی نسبت مصرف انرژی

منحنی‌های اتلاف اکسرژی برای هویج‌های با ابعاد و عمق بستر ثابت که تحت تاثیر دمای ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته‌اند در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین مقدار اتلاف اکسرژی ۱/۶۱۲ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۴×۴×۴، عمق اولیه بستر ۹۰ میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس بود. کمترین مقدار اتلاف اکسرژی ۰/۲۰۶ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰، عمق اولیه بستر ۳۰ میلی‌متر و دمای ۵۰ درجه سلسیوس بود. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود تلفات اکسرژی با گذشت زمان خشک شدن به طور پیوسته کاهش می‌یابد که آنرا می‌توان اینگونه توجیه کرد که با گذشت زمان مقدار رطوبت نمونه‌ها کاهش می‌یابد و همان طور که می‌دانیم مقدار رطوبت کمتر قابلیت جذب اکسرژی کمتری را دارد، بنابراین هوای خروجی نسبت به هوای ورودی اکسرژی کمتری دارد. یافته‌های مشابهی توسط چندین محقق گزارش شده‌است که در مورد تاثیر دمای هوا بر روی تلفات اکسرژی مطالعه کرده‌اند (Akpinar, ۲۰۰۴, Akpinar و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶). دمای هوای خشک کردن بالاتر مقدار اکسرژی بیشتری دارد و این اکسرژی وارد شده سبب افزایش تبخیر آب یا مصرف اکسرژی می‌شود و بنابراین اتلاف اکسرژی افزایش می‌یابد.



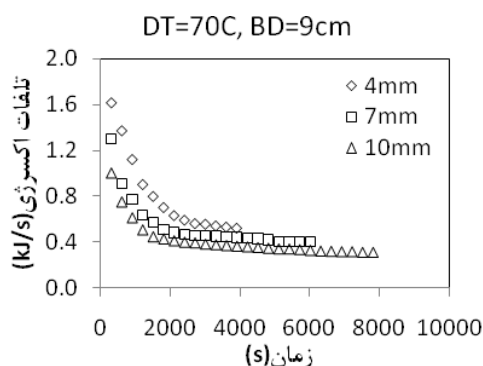
شکل ۸- تاثیر دمای هوا روی تلفات اکسرژی

منحنی‌های اتلاف اکسرژی برای هویج‌های با اندازه ابعاد و دمای هوای خشک شدن ثابت که تحت تاثیر عمق بستر ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش عمق بستر، اتلاف اکسرژی را افزایش می‌دهد، زیرا با افزایش عمق بستر جرم نمونه‌ها افزایش می‌یابد و همراه با آن دمای هوای خروجی کاهش پیدا می‌کند. می‌توان نشان داد مقدار زیادی از اکسرژی وارد شده برای خشک شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار کمی از این اکسرژی در عمق بستر زیاد در خروجی جریان هوا از بین می‌رود.



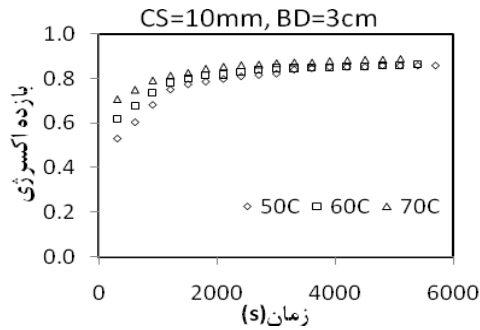
شکل ۹- تاثیر عمق بستر روی تلفات اکسرژی

منحنی‌های تلفات اکسرژی برای هویج‌های خشک شده در عمق بستر و دمای هوای ثابت که تحت تاثیر اندازه ابعاد ۴ تا ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته بودند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با کاهش اندازه ابعاد مکعب‌های هویج، مقدار تلفات اکسرژی به دلیل سطح تماس بیشتر بین نمونه‌ها و جریان هوا، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین اکسرژی بیشتری به سبب انتقال حرارت و جرم بیشتر در محفظه خشک‌کن مورد استفاده قرار می‌گیرد.



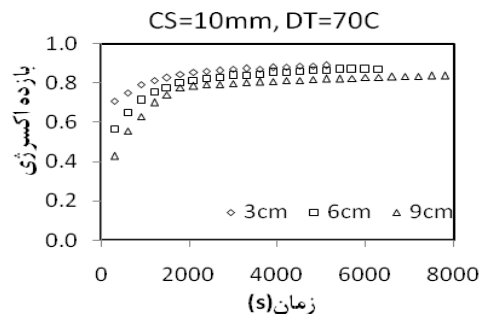
شکل ۱۰- تاثیر اندازه مکعب بر روی تلفات اکسرژی

منحنی‌های بازده اکسرژی برای هویج‌های خشک شده با ابعاد و عمق بستر ثابت که تحت تاثیر دمای‌های ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته‌اند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین بازده اکسرژی ۰/۷۰۷ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰، عمق بستر ۳۰ میلی‌متر و دمای هوای ۷۰ درجه سلسیوس به دست آمد. کمترین بازده اکسرژی ۰/۱۰۳ کیلوژول بر ثانیه برای هویج‌های با ابعاد ۴×۴×۴، عمق بستر ۹۰ میلی‌متر و دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود بازده اکسرژی با گذشت زمان به طور پیوسته افزایش پیدا می‌کند. افزایش دمای خشک شدن باعث افزایش اتلاف اکسرژی در محفظه خشک‌کن می‌شود ولی این مقدار کمتر از مقدار افزایش اکسرژی ورودی است، بنابراین با افزایش دمای خشک‌کن، بازده اکسرژی مطابق رابطه ۱۰ افزایش پیدا می‌کند.



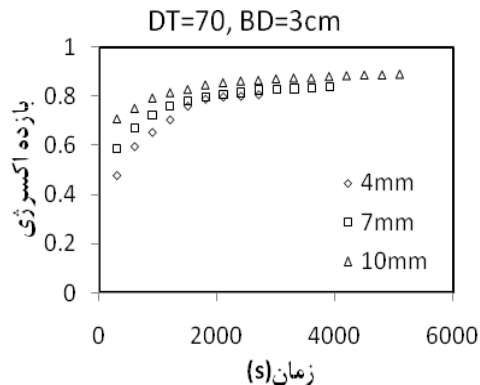
شکل ۱۱- تاثیر دمای هوا بر روی بازده اکسرژ

منحنی‌های بازده اکسرژ برای هویج‌های با اندازه ابعاد و دمای هوای ثابت که تحت تاثیر عمق ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر خشک شده‌اند، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد اتلاف اکسرژ با افزایش عمق زیاد شده و در نتیجه با افزایش عمق بستر، بازده اکسرژ کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین اکسرژ فراهم شده صرف خشک شدن عمق بستر شده و برای هوای خروجی مقدار کمی انرژی مفید وجود دارد.



شکل ۱۲- تاثیر عمق بستر بر بازده اکسرژ

منحنی‌های بازده اکسرژ برای هویج‌های با عمق بستر و دمای هوای ثابت که تحت تاثیر اندازه‌های مکعب از ۴ تا ۱۰ میلی‌متر خشک شده‌اند، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد با کاهش اندازه مکعب‌ها اتلاف اکسرژ افزایش می‌یابد، بنابراین بازده اکسرژ طبق رابطه ۱۱ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- تاثیر اندازه مکعب بر روی بازده اکسرژ

مقایسه مقادیر کوچکتر بازده اکسرژ به دست آمده از آزمایشات با نتایج تحقیقات گذشته (Akpinar, ۲۰۰۴, Akpinar و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶)، بازدهی بهتر ترمودینامیکی خشک شدن به روش بستر سیال نسبت به روش خشک کردن به روش توده

را خصوصاً در مرحله ابتدایی خشک شدن، اثبات می‌کند. برای خشک‌کن‌های بستر سیال در مقایسه با خشک‌کن‌های توده-ای مقدار نرخ جریان هوای داغ بیشتر در محفظه خشک‌کن، مصرف انرژی و نرخ خشک شدن را افزایش می‌دهد. مصرف انرژی خشک‌کن‌های بستر سیال باید بوسیله کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای خشک شدن به مقدار بیشینه افزایش یابد تا کیفیت بهینه ماده خشک شونده همراه با زمان خشک شدن و مصرف انرژی پایین را به دنبال داشته باشد.

در این تحقیق تاثیر پارامترهای اصلی خشک شدن بر روی انرژی و اکسرژی مطالعه و ثابت شد تغییر در این پارامترها عملکرد خشک‌کن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بعنوان مثال مواد با اندازه ریزتر و دما و عمق بستر بیشتر، مصرف انرژی و قسمت مطلوب اکسرژی مورد استفاده که اتلاف اکسرژی نام دارد را افزایش می‌دهند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد افزایش مصرف انرژی و اتلاف اکسرژی، افزایش نسبت مصرف انرژی و کاهش بازده اکسرژی را به دنبال دارد. بنابراین ورود انرژی و اکسرژی به محفظه خشک‌کن می‌تواند با افزایش نسبت مصرف انرژی و کاهش بازده اکسرژی کاهش یابد. کاهش در مصرف انرژی بر پذیرش اقتصادی خشک‌کن بستر سیال نسبت به خشک‌کن‌های معمولی دلالت می‌کند. مقادیر نسبت مصرف انرژی و بازده اکسرژی بی‌بعد هستند. مقادیر به دست آمده با مقادیر انتشار یافته مقایسه شدند. در این تحقیق بیشترین مقدار نسبت مصرف انرژی و کمترین مقدار بازده اکسرژی در ابتدای فرایند خشک شدن به ترتیب $0/486$ کیلوژول بر ثانیه برای $BD=90$ ، $T=70^{\circ}C$ و $CS=4 \times 4 \times 4$ و $0/103$ کیلوژول بر ثانیه برای $BD=90$ ، $T=50^{\circ}C$ و $4 \times 4 \times 4$ بود.

Akpinar، 2004 ، برای فلفل قرمز بیشترین مقدار نسبت مصرف انرژی $0/188$ ، و کمترین مقدار بازده اکسرژی $0/672$ را گزارش کرد. خشک کردن بوسیله خشک‌کن هوای داغ متداول در دمای $70^{\circ}C$ و سرعت $1/5$ متر بر ثانیه انجام گرفته بود. **Corzo** و همکاران، 2008 ، بیشترین مقدار نسبت مصرف انرژی $0/008$ ، و کمترین مقدار بازده اکسرژی $0/8$ ، را برای خشک کردن ورقه‌های کوروبا **coroba** به ترتیب در دمای $82^{\circ}C$ و سرعت $0/82$ متر بر ثانیه و دمای $71^{\circ}C$ و سرعت هوای $0/82$ متر بر ثانیه گزارش کرد. داده‌های به دست آمده از این تحقیق با داده‌های منتشر شده مقایسه شده و مناسب بودن خشک‌کن بستر سیال نسبت به خشک‌کن توده برای مواد بیولوژیکی مرطوب اثبات شد.

با عایق‌بندی محفظه خشک‌کن، طراحی و انتخاب اجزا مناسب، انتخاب شرایط بهینه خشک کردن، ترکیب خشک‌کن بستر سیال با خشک‌کن توده و با تکنیک‌های دیگر خشک کردن مانند میکروویو، مادون قرمز و غیره می‌توان به افزایش بازده ترمودینامیک خشک‌کن‌های بستر سیال کمک کرد. در آخر بازده اکسرژی ابزار ارزشمندی برای تشخیص دادن تلفات کلیدی سیستم و عملکرد بهینه خشک‌کن‌های صنعتی است.

تاثیر اندازه مواد، عمق بستر و دمای هوا روی مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی، اتلاف اکسرژی و بازده اکسرژی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای خشک‌کن و عمق بستر، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد در حالیکه افزایش ابعاد مکعب‌ها مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. افزایش دمای خشک کردن و عمق بستر نسبت مصرف انرژی را افزایش می‌دهد در حالیکه افزایش اندازه مکعب‌ها نسبت مصرف انرژی را کاهش می‌دهد افزایش دمای هوای خشک‌کردن و عمق بستر، تلفات اکسرژی را افزایش داد در حالیکه افزایش ابعاد مکعب‌ها تلفات اکسرژی را کاهش داد. افزایش دمای هوای خشک‌کن در مرحله ابتدایی خشک کردن بازده اکسرژی را افزایش و در انتهای زمان خشک شدن و در دماهای مختلف تقریباً یکسان بود. افزایش عمق بستر بازده اکسرژی را کاهش داد در حالیکه افزایش ابعاد مکعب‌ها بازده اکسرژی را افزایش داد. به‌طور کلی مواد ریزتر با عمق بستر اولیه بیشتر و دمای هوای ورودی بالاتر بازده اکسرژی را افزایش داد.

1. Aghbashlo M, Kianmehr MH, Arabhosseini A. 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Drying Technology*; 26: 1501–1508.
2. Aghbashlo M, Kianmehr MH, Arabhosseini A. 2009. Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Engineering*; 91: 99–108.
3. Akbulut A, Durmus A. 2010. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*; 35: 1754-1763.
4. Akpinar EK. 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in convective type dryer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 31(8): 1165–1176.
5. Akpinar EK, Midilli A, Bicer Y. 2005. Energy and exergy of carrots drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management*; 46(15/16): 2530–2552.
6. Akpinar EK, Midilli A, Bicer Y. 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*; 72(4): 320–331.
7. Celma AR, Cuadros F. 2009. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*; 34: 660-666.
8. Ceylan I, Aktas M, Dogan H. 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering*; 27: 216–222.
9. Corzo O, Bracho N, Vasquez A, Pereira A. 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering*; 86: 151–161.
10. Dincer I, Sahin AZ. 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 47(4): 645–652.
11. Jia X, Jolly P, Clemets S. 1990. Heat pump assisted continues drying part.2: Simulation results. *International journal of energy research*; 14: 771-782.
12. Midilli A, Kucuk H. 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*; 28: 539–556.
13. Mujumdar AS. 2006. *Hand Book of Industrial Drying*. Thrid Ed. Marcel Dekker, New York.
14. Sahin AZ, Dincer I. 2002. Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 45(16): 3267–3273.
15. Smith PG. 2007. *Applications of Fluidization to Food Processing*. Blackwell Science, Oxford, UK.
16. Soysal C, Soylemez Z. 2005. Kinetics and inactivation of carrot peroxidase by heat treatment. *Journal of Food Engineering*; 68: 349–356.

17. Stanislawski J. 2005. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer. *Drying Technology*; 23(8): 1711 – 1721.
18. Syahrul S, Dincer I, Hamdullahpur F. 2003. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Sciences*; 42: 691–701.
19. Syahrul S, Hamdullahpur F, Dincer I. 2002. exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*; 2: 87–98.
20. Syahrul S, Hamdullahpur F, Dincer I. 2002. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*; 22: 1763–1775.
21. Topic R. 1995. Mathematical model for exergy analysis of drying plants. *Drying Technology*; 13(1–2): 437–4.

Abstract

In this study, the energy and exergy analyses of fluidized bed drying of carrot cubes were investigated. Drying experiments were conducted at inlet air temperatures of 50, 60 and 70 °C, bed depths of 30, 60 and 90 mm and square–cubed carrot dimensions of 4, 7 and 10 mm. The effects of drying variables on energy utilization, energy utilization ratio, evaporation heat, exergy loss and exergy efficiency were studied. The energy utilization and energy utilization ratio varied between 0.105 to 1.949 kJ/s and 0.074 to 0.486, respectively. The evaporation heat varied between 0.35 to 0.928 kJ/s. The exergy loss and exergy efficiency were found to be in the range of 0.206 to 1.612 kJ/s and 0.103 to 0.707, respectively. The results showed that smaller particle sizes, deeper beds and higher inlet air temperatures increased energy utilization and decreased energy losses from outlet air.

Keywords: Energy, exergy, fluidized bed drying, carrot cubes