

## تحلیل انرژی خشک کن ترکیبی بستر سیال-ثابت

وحید ورطه پرور<sup>۱</sup>، محمد حسین کیانمهر\*<sup>۲</sup>، اکبر عرب حسینی<sup>۱</sup>، سید رضا حسن بیگی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲

### چکیده

در خشک کن‌های بسترسیال، بالا بودن سرعت هوای ورودی به محفظه، منجر می‌شود که هوا بدون اشباع شدن از رطوبت از محفظه خارج شده و تلفات انرژی بالا باشد. از این رو خشک کن بسترسیال را با خشک بستر ثابت، به صورتی که بستر ثابت در ادامه مسیر هوای خروجی از بستر سیال قرار بگیرد ترکیب گردیده است. در این تحقیق مطابق قانون اول ترمودینامیک به تحلیل انرژی و پارامترهای موثر بر میزان مصرف و نسبت مصرف انرژی آن در خشک کن ترکیبی پرداخته شده است. آزمایش‌ها بر روی محصول گندم انجام شد و اثر سه دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس و سه ضخامت بستر ۴، ۶، ۸ سانتی متر در طبقه‌ی تحتانی (بستر سیال) و دو ضخامت ۶، ۸ سانتی متر در طبقه‌ی فوقانی (بستر ثابت) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد روند تغییرات مصرف انرژی مستقل از نوع روش خشک شدن می‌باشد. افزایش ضخامت هر طبقه بر روی مصرف انرژی طبقه دیگر اثر گذار است. بیشترین مصرف انرژی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت  $\Delta d_w - \Delta u_p$  و بیشترین نسبت مصرف انرژی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت  $\Delta d_w - \Delta u_p$  حاصل شد.

**واژه‌های کلیدی:** نسبت مصرف انرژی، بستر ثابت، بستر سیال، خشک کن، قانون اول ترمودینامیک.

## ۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و نیاز بیش از پیش به مواد غذایی و در پی آن محدودیت منابع انرژی مورد نیاز جهت فرآوری آنها و همچنین افزایش هزینه‌ها انرژی در سالهای اخیر، اهمیت توجه به ضایعات و تلفات محصولات کشاورزی و منابع فرآوری آنها را آشکار می‌سازد. به طور کلی بدون صرف انرژی هیچ فرآوری امکان‌پذیر نبوده و طبق قانون دوم ترمودینامیک مصرف هر نوع انرژی نیز بدون تلفات نمی‌باشد. اما آنچه که مهم است کنترل و کاهش میزان تلفات و در صورت امکان اقتصادی، بازیافت انرژی‌های در حال هدر رفت می‌باشد. در مرحله خشک کردن انرژی و به دنبال آن هزینه‌های زیادی صرف می‌شود به طوری که ۱۲ درصد انرژی کل مصرفی در فرآیندهای تولید صرف خشک کردن، و همچنین بیش از ۶۰ درصد هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهد (۱۰).

تحلیل‌های ترمودینامیکی نقش مهمی را در تحلیل فرآیند صنعتی داشته و قانون اول ترمودینامیک استفاده گسترده‌ای در تعادل حرارتی در مهندسی و طراحی سیستم‌ها دارند. در صنعت خشک کردن، هدف آن است که با صرف کمترین انرژی بیشترین مقدار رطوبت زدایی برای رسیدن به رطوبت مطلوب حاصل شود (۳). خشک کردن به شیوه‌های مختلفی از جمله روش بسترسیال صورت می‌گیرد. سیال سازی با هوا روشی است که ذرات جامد بتوانند خصوصیت شبه سیال به خود بگیرند مانند شکل ظرف، جاری شدن و سرزیر شدن (۹). هنگام عبور یک سیال همچون هوا از میان بستر ذرات در دبی کم، فقط سیال از بین فضای خالی بین ذرات عبور کرده و با افزایش بیشتر دبی، ذرات کاملاً معلق می‌شوند، در این نقطه نیروی اصطکاک بین ذرات و سیال با وزن ذرات موازنه می‌شود. این مرحله آغاز سیال شدگی بستر در حداقل سیال سازی<sup>۱</sup> می‌باشد (۶). این روش خشک کردن در سالهای اخیر به دلیل مزیت‌هایی از قبیل یکنواختی در خشک کردن و انتقال جرم و حرارت بالا نسبت به سایرین کاربرد بیشتری یافته است. ولی از طرفی این سیال سازی سبب صرف و افزایش تلفات بیشتر انرژی نیز می‌گردد.

با توجه به مکانیزم خشک شدن، اتلاف انرژی بیشتر از طریق هوایی انجام می‌شود که جهت خشک کردن مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرا جهت افزایش سرعت خشک شدن و در نهایت پایین

آوردن زمان خشک شدن سرعت جریان هوای گرم را زیاد کرده و در نتیجه قبل از اشباع شدن از رطوبت از خشک کن خارج می‌شود. ولی هوای خروجی بدلیل داشتن رطوبت، دارای آنتالپی بوده که می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی مطرح باشد.

Kaensup and Wongwises (۲۰۰۴)، خشک کن مایکروویو را با خشک کن بستر سیال ترکیب کرده و دانه‌های فلفل را خشک کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که میدان مایکروویو می‌تواند پتانسیل خشک کن بستر سیال را افزایش دهد. زمان لازم برای خشک شدن و رسیدن به حد مطلوب در حالت ترکیبی ۸۰ الی ۹۰٪ کمتر از حالت بستر سیال متداول گزارش شده است (۵).

Akpinar و همکاران (۲۰۰۵) نیز با بررسی اثر سرعتها و دماهای مختلف به تحلیل ترمودینامیکی خشک کن چرخشی با دو سینی پرداخته و مصرف انرژی و میزان نسبت مصرف انرژی را بر روی سیب زمینی بررسی کردند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان خشک شدن میزان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما و افزایش سرعت نیز باعث افزایش میزان مصرف انرژی گردیده است (۲).

Nazghelichi و همکاران (۲۰۱۰) به تحلیل انرژی خشک شدن هویج در خشک کن بسترسیال پرداختند و پارامترهایی همچون اندازه ذرات، ضخامت و سرعت هوا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان هوا و ضخامت بستر و همچنین کاهش اندازه ذرات، مصرف انرژی افزایش می‌یابد (۷).

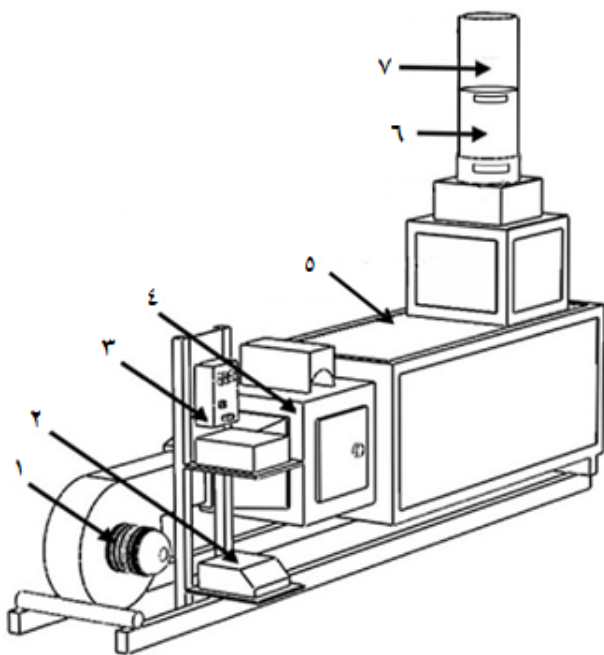
همانطور که گفته شد چون هوای خروجی از خشک کن بستر سیال دارای انرژی می‌باشد، در این تحقیق قابلیت استفاده از هوای خروجی از خشک کن بستر سیال در حالت حداقل سیالیت برای استفاده مجدد در خشک کن بستر ثابت و تحلیل ترمودینامیکی و میزان مصرف انرژی خشک کن ترکیبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که در زمان انجام آزمایشها رطوبت نسبی هوای محیط ۴۰٪ و دما هوای محیط ۲۶ درجه سلسیوس بوده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- تهیه و آماده سازی محصول

گندم رقم قدس از منطقه شهرستان پاکدشت تهیه گردید. شهرستان پاکدشت واقع در شرق استان تهران در طول و عرض

سیال سازی، سرعت دمنده با استفاده از اینورتر افزایش داده تا جایی که مواد طبقه‌ی تحتانی به حالت حداقل سیالیت برسند، بدون اینکه در مواد طبقه بالا سیال سازی اتفاق بیفتد. آزمایش‌ها در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ سانتی متر برای هر طبقه به ترتیب  $4_{dw}-8_{up}$ ،  $6_{dw}-8_{up}$ ،  $8_{dw}-8_{up}$  و  $4_{dw}-6_{up}$  انجام شد که عدد سمت چپ ضخامت طبقه‌ی تحتانی<sup>۱</sup> و عدد سمت راست ضخامت طبقه‌ی فوقانی<sup>۲</sup> می‌باشد. طرح شماتیک محفظه خشک کن و پارامترهای ورودی و خروجی به هر طبقه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- 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

#### ۴-۲- تئوری

با توجه به جنس محفظه که از پلکسی گلاس به ضخامت ۰/۵ سانتی متر است و با عایق در نظر گرفتن دیواره، سیستم آدیاباتیک فرض شده است. طبق قانون اول ترمودینامیک داریم (۷):

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

جغرافیایی ۵۱/۴۰ درجه و ۳۵/۲۸ درجه با ارتفاع ۱۰۱۳ متر از سطح دریا در جنوب رشته کوه البرز قرار گرفته است. قبل از شروع آزمایش‌ها، ناخالصی‌ها و دانه‌های شکسته کاملاً از گندم جدا شد. با توجه به رطوبت اولیه گندم خشک که حدود ۵ الی ۶ درصد بر مبنای تر بود به ازای هر کیلو گندم، حدود ۲۵۰ گرم آب به صورت اسپری کردن به آن اضافه گردید. سپس به مدت حداقل ۴ روز در داخل بسته‌های نایلونی درون یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد تا رطوبت به طور یکنواخت توزیع شود. گندم نهایی آماده شده دارای رطوبت ۲۴-۲۵ درصد بر پایه تر بود که رطوبت محصول با قرار دادن در داخل آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس بدست آمد.

#### ۲-۲ خشک کن آزمایشگاهی

در این تحقیق از یک خشک کن آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). طرز کار خشک کن بدین صورت است که هوای محیط توسط دمنده از کوره که از تعدادی هیتر الکتریکی تشکیل شده است عبور می‌کند و دمای هوا توسط ترموستات تنظیم می‌گردد. مقدار هوا و در نتیجه سرعت خروجی هوا از محفظه خشک کن توسط اینورتر تنظیم شد. برای ثابت بودن دما با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس تعدادی هیتر به طور ثابت و ولتاژی حدود ۲۵ ولت در کنترل ترموستات در مدار قرار دارند. با عبور هوا از محفظه‌ای که سبب آرامش (جریان لامینار) هوای عبوری می‌گردد، به زیر محفظه پلکسی گلاس که محل قرارگیری نمونه‌ها است وارد می‌شود. ارتفاع کل محفظه ۳۰ سانتی متر است که ۱۵ سانتی متر برای طبقه‌ی تحتانی به منظور بستر سیال و ۱۵ سانتی متر دیگر برای طبقه‌ی فوقانی بستر ثابت، در نظر گرفته شده است. یک سبد توری در داخل پلکسی گلاس این دو محفظه را از هم جدا می‌کند. جهت کاهش اثر محیط، بدنه خشک کن به طور کامل عایق‌بندی شد. ترموکوپل بکار رفته از نوع K بوده و سرعت هوای خروجی به وسیله سرعت سنج هوا مدل Anemometer, AM-4206 اندازه‌گیری شد. جهت توزین نمونه‌ها از یک ترازوی دیجیتال با دقت یک گرم استفاده شد.

#### ۳-۲ نحوه انجام آزمایش‌ها

در شروع آزمایش هر دو طبقه محفظه خشک کن از گندم مرطوب تا ضخامت مشخص پر شد. برای رسیدن به حداقل سرعت

$$\dot{m}_v = \frac{(W_t - W_{t+\Delta t})}{\Delta t} \quad (10)$$

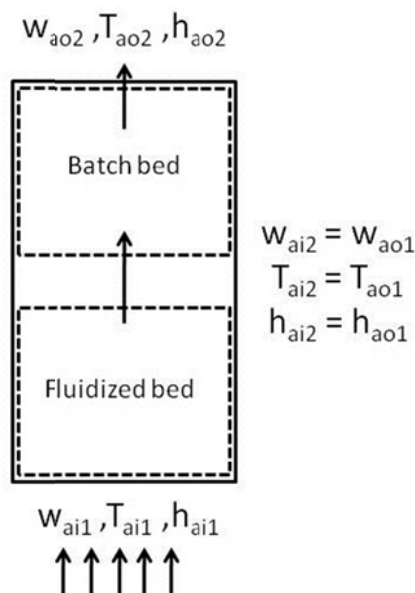
$W$  وزن محصول ( $kg$ ) می‌باشد.

نسبت مصرف انرژی که به نسبت انرژی مصرف شده به انرژی مهیا شده در محفظه خشک کن تعریف می‌شود از رابطه ۱۱ و ۱۲ حاصل می‌شود که  $EUR_1$  و  $EUR_2$  به ترتیب مربوط به طبقه‌ی تحتانی و طبقه‌ی فوقانی می‌باشند (۲):

$$EUR_1 = \frac{\dot{m}_{a1}(h_{ai1} - h_{ao1})}{\dot{m}_a(h_{ai} - h_{ae})} \quad (11)$$

$$EUR_2 = \frac{\dot{m}_{a2}(h_{ai2} - h_{ao2})}{\dot{m}_a(h_{ai} - h_{ae})} \quad (12)$$

در این رابطه  $h_{ae}$  آنتالپی هوای محیط و هم‌چنین  $h_{ai2} = h_{ao1}$  می‌باشد.



شکل ۲- طرح شماتیک محفظه خشک کن

### ۳- نتایج و بحث

روند تغییرات مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای هر دو طبقه با وجود متفاوت بودن روش خشک کن یکسان می‌باشد که بیانگر مستقل بودن تغییرات مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی از شیوه خشک شدن می‌باشد. هم‌چنین نتایج حاصله مشابه نتایج سایر تحقیقات انجام شده می‌باشد (۳، ۷). در ادامه به تحلیل دقیق‌تر نتایج پرداخته شده است.

$\dot{m}_a$  دبی جرمی هوا ( $kg/s$ )،  $\dot{m}_{ao}$  و  $\dot{m}_{ai}$  دبی جرمی هوا به ترتیب در ورودی و خروجی محفظه خشک کن می‌باشند. طبق معادله عمومی قانون بقای انرژی:

$$Q - W = \sum \dot{m}_{ao} \left( h_{ao} \frac{v_{ao}^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_{ai} \left( h_{ai} \frac{v_{ai}^2}{2} \right) \quad (2)$$

بنابراین برای محاسبه انرژی مصرفی داریم (۱۲):

$$EU = \dot{m}_a(h_{ai} - h_{ao}) \quad (3)$$

$Eu$  انرژی مصرفی ( $kJ/s$ )،  $h_{ao}$  و  $h_{ai}$  به ترتیب آنتالپی هوای ورودی و خروجی ( $kJ/kg$ )، که مقدار دبی هوا از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$\dot{m}_a = \rho_a v_a A_{dc} \quad (4)$$

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

آنتالپی ورودی و خروجی را به ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود (۱، ۴، ۸):

$$h_{ai} = C_{pa}T + h_{fg}w \quad (5)$$

$$h_{ao} = h_{ai} - h_{fg}w_o \quad (6)$$

$C_{pa}$  گرمای ویژه هوا ( $kJ/kgK$ )،  $T$  دما ( $K$ )،  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب ( $kJ/kg$ ) و  $w$  نسبت رطوبت (نسبت وزنی آب به هوا) می‌باشد.

برای گرمای ویژه هم داریم (۴):

$$C_{pa} = 1.004 + 1.88w \quad (7)$$

مقدار نسبت رطوبت ورودی و نسبت رطوبت خروجی هر کدام به ترتیب از رابطه‌های ۸ و ۹ حاصل می‌شوند (۱):

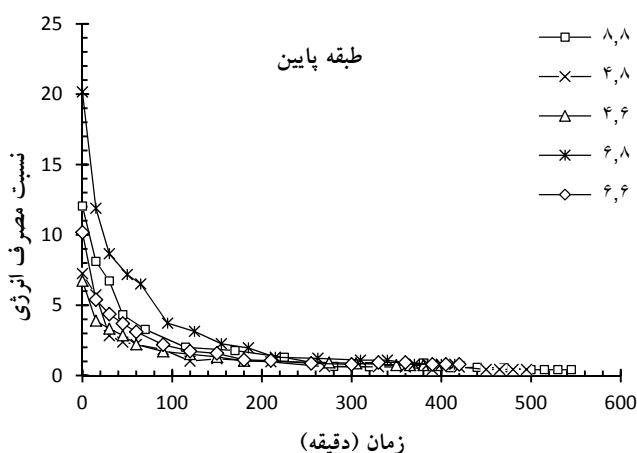
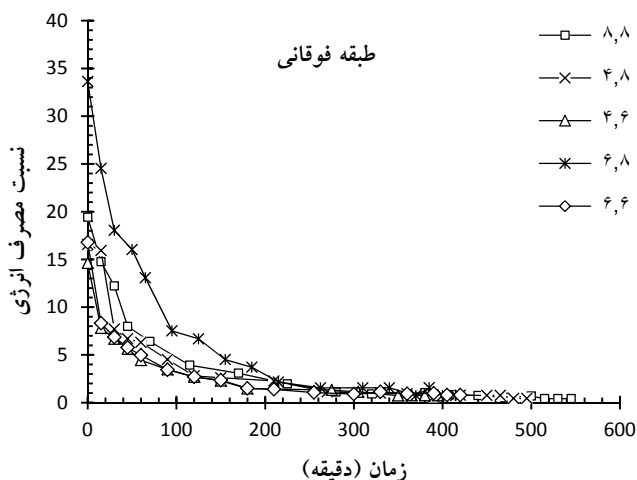
$$w = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}} \quad (8)$$

$\phi$  رطوبت نسبی هوا (%) می‌باشد.

$$w_{ao} = w_{ai} + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad (9)$$

$\dot{m}_v$  هم از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (۱):

شده است. بعد از آن بیشترین مصرف انرژی متعلق به طبقه‌ی فوقانی و حالتی است که طبقه‌ی تحتانی ۶ سانتی متر و طبقه‌ی فوقانی ۸ سانتی متر است. ضخامت‌های ۴ سانتی متر برای طبقه‌ی تحتانی و ۶ سانتی متر برای طبقه‌ی فوقانی مصرف انرژی کمتری دارند.

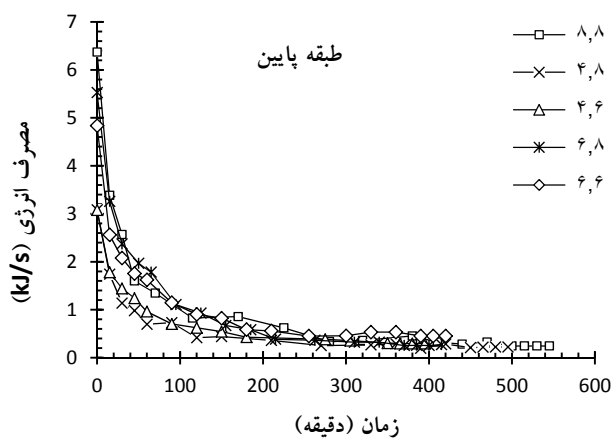
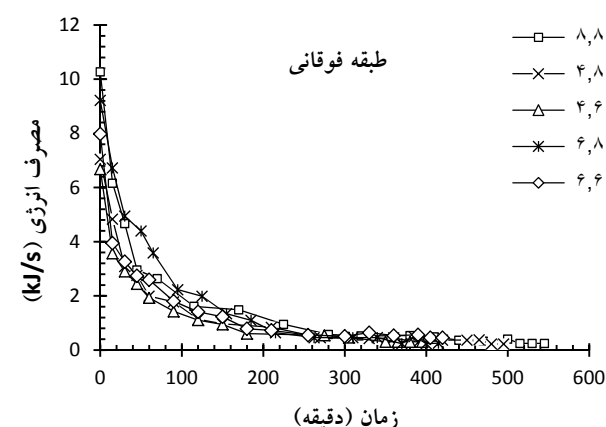


شکل ۴- نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی و طبقه‌ی تحتانی ضخامت‌های مختلف و در دمای ۵۰، درجه سلسیوس

نسبت مصرف انرژی برای طبقه‌ی فوقانی و طبقه‌ی تحتانی ضخامت‌های مختلف و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس در شکل ۴ نشان داده شده است. نسبت مصرف انرژی بیانگر آن است که برای انجام فرآیند خشک شدن تحت شرایط معین چقدر انرژی نسبت به انرژی موجود در هوای محیط مصرف شده است. در دمای ۵۰ درجه سلسیوس حالت  $6_{dw}-8_{up}$  در هر دو طبقه در آغاز زمان خشک شدن بیشترین مقادیر را به ترتیب ۲۰/۱۵ و ۳۳/۶ درصد برای طبقه‌ی تحتانی و طبقه‌ی فوقانی داشته است و با گذشت زمان در انتهای فرآیند خشک شدن حالت‌های  $8_{dw}-8_{up}$  و  $4_{dw}-8_{up}$  بیشترین مقادیر را به ترتیب ۲/۶۹ و ۲/۷ درصد برای طبقه‌ی تحتانی

### ۳-۱- اثر ضخامت هر دو طبقه بر مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی در دمای ثابت

اثر ضخامت‌های مختلف در دمای ۵۰ درجه سلسیوس روی مصرف انرژی در شکل ۳ نشان داده شده است. بیشترین مصرف انرژی برای هر دو طبقه مربوط به ضخامت  $8_{dw}-8_{up}$  می‌باشد. هر چند مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی بیشتر از طبقه‌ی تحتانی می‌باشد. دلیل آن به خاطر تاثیر رطوبت طبقه‌ی تحتانی بر هوای ورودی به طبقه‌ی فوقانی می‌باشد. مصرف انرژی برای طبقه‌ی فوقانی  $10/26 \text{ kJ/s}$  در آغاز و  $0/25 \text{ kJ/s}$  در انتهای فرآیند است.



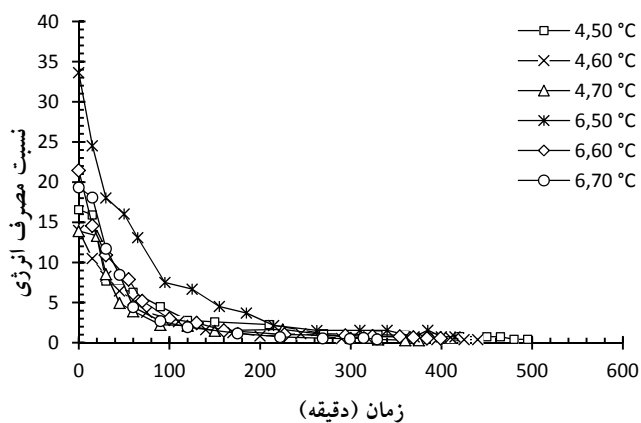
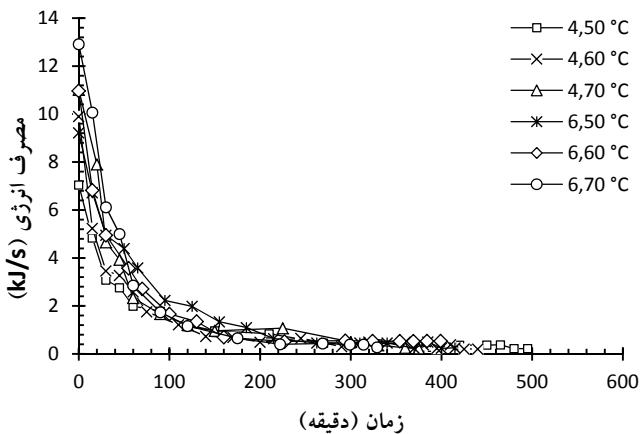
شکل ۳- مصرف انرژی محصول طبقه‌ی فوقانی و تحتانی در ضخامت‌های مختلف و در دمای ۵۰، درجه سلسیوس

به طور کلی در انتهای فرآیند تفاوت قابل توجهی برای ضخامت‌های مختلف وجود ندارد و تنها در آغاز آزمایش مقادیر متفاوتی از مصرف انرژی بدست آمده است. علت آن به دلیل میزان متفاوت رطوبت دفع شده در لحظه‌های شروع آزمایش به دلیل تفاوت در ضخامت بوده است که در انتها آزمایش با رسیدن به یک رطوبت تعادلی مقادیر مصرف انرژی نزدیک به هم حاصل

مصرف انرژی نزدیک به هم بدست آمده است. در ابتدای آزمایش با دماهای بالا به دلیل دادن رطوبت زیاد در واحد زمان مقادیر نسبت مصرف انرژی بالاتر می‌باشد. ولی در انتهای آزمایش با رسیدن به رطوبت تعادلی و به دلیل بزرگ شدن مخرج کسر در رابطه ۱۱ و ۱۲ حالت‌های با دمای کمتر مقدار بیشتری به خود اختصاص داده‌اند.

### ۳-۳-۱ اثر ضخامت بستر سیال بر مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی بستر ثابت

شکل ۶ اثر ضخامت‌های مختلف طبقه‌ی تحتانی و دماهای مختلف را بر روی مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی، در ضخامت ثابت ۶ سانتی متر در طبقه‌ی فوقانی نشان می‌دهند.



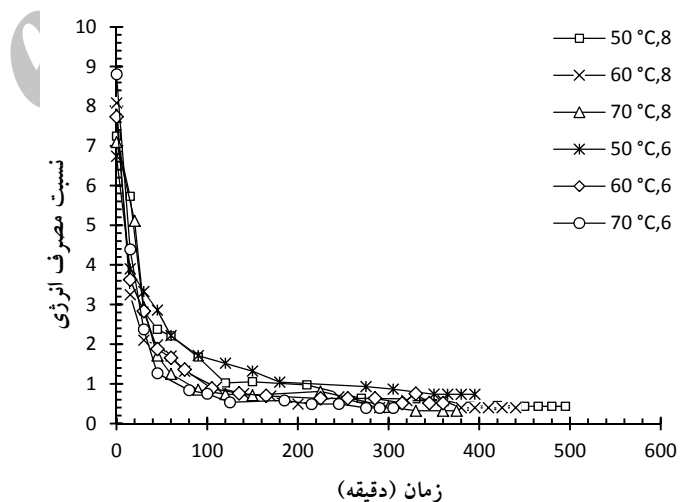
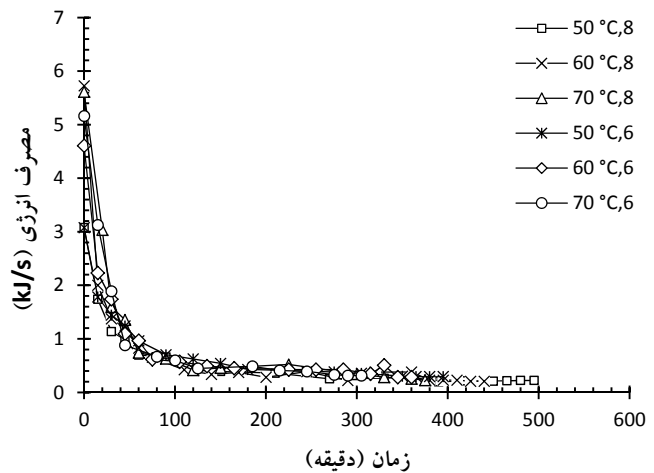
### شکل ۶- مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی در ضخامت ثابت ۸ سانتی متری طبقه‌ی فوقانی و در دماها و ضخامت‌های مختلف طبقه‌ی تحتانی

در یک دمای معین با افزایش ضخامت طبقه‌ی تحتانی مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی در لحظه‌های شروع آزمایش افزایش یافته است. هم‌چنین در یک ضخامت ثابت افزایش دما سبب افزایش

و طبقه‌ی فوقانی دارند. نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی همواره بیشتر از طبقه‌ی تحتانی است.

### ۳-۲-۲ اثر ضخامت بستر ثابت بر مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی بستر سیال

شکل ۵ بیانگر اثر ضخامت‌های مختلف طبقه‌ی فوقانی در دماهای مختلف بر مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای طبقه‌ی تحتانی در ضخامت ثابت ۴ سانتی متر طبقه‌ی تحتانی است.



### شکل ۵- مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی تحتانی در ضخامت ثابت ۴ سانتی متری طبقه‌ی تحتانی و در دماها و ضخامت‌های مختلف طبقه‌ی فوقانی

در دمای ثابت، افزایش ضخامت بستر ثابت سبب افزایش انرژی مصرفی بستر سیال گردیده است. از این رو حالت ۸-۷۰ که بیانگر دمای ۷۰ درجه سلیسیوس و ضخامت ۸ سانتی متر طبقه‌ی فوقانی است، بیشترین مقدار مصرف انرژی را نسبت به ضخامت‌ها و مخصوصاً حالت ۶-۷۰ داشته است. در انتهای آزمایش مقادیر

۶- مقادیر مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی در ضخامت‌ها و دماهای مختلف تنها در شروع آزمایش متفاوت بود که با گذشت زمان و از دست دادن رطوبت مقادیر نزدیک به هم حاصل شد.  
۷- افزایش ضخامت سبب افزایش مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی گردید.

#### ۵- منابع

- 1- Akpinar, E. K. 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in convective type dryer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 31: 1165-1176.
- 2- Akpinar, E. K., A. Midilli, A. B. and Bicer, Y. 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management*. 46: 2530-2552.
- 3- Akpinar, E. K., A. Midilli, A. and Bicer, Y. 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*. 72: 320-331.
- 4- Corzo, O., Bracho, N., Vasquez, A. and Pereira, A. 2008. Energy and exergy analysis of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering*. 86: 151-161.
- 5- Kaensup, W. and Wongwises, S. 2004. Combined microwave/fluidized bed drying of fresh peppercons. *Drying Technology*. 22: 779-794.
- 6- Mujumdar, A. S. 2006. *Hand book of industrial drying*. 3<sup>rd</sup> Ed. Marcel Dekker, New York.
- 7- Nazghelichi, T., Kianmehr, M. H. and Aghbashlo, M. 2010. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy* 35: 4679-4684.
- 8- Prommas, R., Keangin, P. and Rattanadecho, P., 2010. Energy and exergy analyses in convective drying process of multi-layered porous packed bed. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37: 1106-1114.
- 9- Smith, P. G. 2007. *Application of fluidization to food processing*. Blackwell Science. Oxford, UK.
- 10- Syahrul, S., Dincer, I. and Hamdullahpur, F. 2002b. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*. 22: 1763-1775.
- 11- Syahrul, S. F., Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. Energy analysis in Fluidized-bed drying of large wet particles. *International Journal of Energy Research*. 26: 507-525.
- 12- Syahrul, S., Dincer, I. and Hamdullahpur, F. 2003. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Science*. 42: 691-701.

مصرف انرژی گردیده است. دلیل هر دو مورد به خاطر افزایش میزان رطوبت دفع شده در لحظه‌های آغازین می‌باشد. افزایش ضخامت نیز سبب افزایش میزان رطوبت از دست داده شده می‌گردد. با کم شدن سرعت دفع رطوبت مقادیر مصرف انرژی به هم نزدیک شده‌اند. به عبارتی هر چند طبقه‌ی فوقانی ضخامتش ثابت است ولی با تغییر ضخامت طبقه‌ی تحتانی مصرف انرژی آن هم تغییر می‌کند و این بیانگر اثر موثر ضخامت بستر سیال بر بستر ثابت است. در ضخامت ثابت ۸ سانتی متری برای طبقه‌ی فوقانی در آغاز فرایند خشک شدن حالت  $70-d_w-6$  بیانگر دمای  $70$  درجه سلسیوس و ضخامت  $6$  سانتی متر طبقه‌ی تحتانی است، بیشترین مقدار  $4-d_w-50$  کمترین مقدار مصرف انرژی را دارند. نسبت مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی نیز با افزایش ضخامت طبقه‌ی تحتانی افزایش و با افزایش دما کاهش یافته است.

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- روند تغییرات مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای یک محصول با دو نوع روش خشک شدن، یکسان می‌باشد.
- ۲- در حالتی که در خشک کن ترکیبی، بستر سیال در طبقه‌ی تحتانی و بستر ثابت در طبقه‌ی فوقانی استفاده شود ضخامت طبقه‌ی فوقانی پارامتری اثر گذار بر مصرف انرژی طبقه‌ی تحتانی و بالعکس می‌باشد.
- ۳- طبق نتایج آزمایش‌ها از میان شرایط مختلف آزمایش شده، بیشترین مقدار مصرف انرژی در دمای  $70$  درجه سلسیوس و ضخامت‌های  $8-d_w-8-d_{up}$  سانتی متر برابر با  $9/08$  kJ/s برای طبقه‌ی تحتانی و  $14/6$  kJ/s برای طبقه‌ی فوقانی و کمترین مقدار مصرف انرژی در دمای  $50$  درجه سلسیوس و ضخامت‌های  $4-d_w-6-d_{up}$  سانتی متر برابر  $3/07$  kJ/s برای طبقه‌ی تحتانی و  $6/67$  kJ/s برای طبقه‌ی فوقانی می‌باشد.
- ۴- در دمای  $50$  درجه سلسیوس و ضخامت  $8-d_w-8-d_{up}$  سانتی متر نسبت مصرف انرژی برای طبقه‌ی تحتانی  $12/04$  و طبقه بالا  $19/4$  بیشترین مقدار بوده و در دمای  $70$  درجه سلسیوس و ضخامت  $8-d_w-8-d_{up}$  سانتی متر با  $0/23$  برای هر دو طبقه کمترین مقدار را دارد.
- ۵- مصرف انرژی طبقه‌ی فوقانی همواره بیشتر از طبقه‌ی تحتانی می‌باشد.