



## طراحی و ساخت خشک‌کن چرخشی با سیکل بسته

جهت کمینه سازی مصرف انرژی و کنترل رطوبت

سید مهدی جعفری<sup>۱</sup>، افشین وحید<sup>۲</sup>، حمید قولی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- کارشناس، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

hamidghouli@yahoo.com

### چکیده

در این تحقیق با توجه به اهمیت بهینه سازی در واحدهای صنعتی غذایی و تکنولوژی پس از برداشت، یک خشک‌کن چرخشی با سیکل بسته طراحی و ساخته شده است. در طراحی این خشک‌کن ابتدا تمام محاسبات مربوط به موازنه جرم و انرژی، انتقال حرارت زمان وقفه، ابعاد خشک‌کن و توان مورد نیاز آن به شکل کلی صورت گرفته است. در مرحله ی بعدی یک سیکل بسته برای این خشک‌کن ایجاد گردید، که به همین دلیل برج جذب رطوبت و سیستم کنترل رطوبت، دما، سرعت چرخش استوانه و سرعت جریان هوا در راستای استفاده مجدد از هوای مصرفی و بهینه سازی در مصرف انرژی، طراحی شده است. این خشک‌کن برای گیاهان دارویی، محصولات دانه ای و بسیاری از محصولات غذایی مختلف قابل استفاده خواهد بود.

**واژه های کلیدی:** خشک‌کن چرخشی، طراحی و ساخت، سیکل بسته، کنترل رطوبت و دما، بهینه سازی

### ۱- مقدمه

فرآیند خشک کردن از مهم ترین فرآیندها در تکنولوژی پس از برداشت می باشد، که در سطحی گسترده با آن سر و کار داریم. این فرایند که در واقع خارج نمودن آب از ماده تر می باشد، یک از قدیمی ترین روش های نگهداری محصولات کشاورزی محسوب می شود. انتقال همزمان جرم از سطح و حرارت به داخل ماده، هیدرودینامیک حرکت ذرات در خشک‌کن ها، مکانیسم های مختلف انتقال و رطوبت در بدنه جسم جامد، تغییر شکل ماده تر، خواص ذاتی محصولات و ... همگی مسائلی هستند که در مبحث طراحی با آن روبرو هستیم (C.Strumilo, T.Kudra, 1986). از طرف دیگر طراحی این فرآیندها نیاز به تحلیل دقیق از انتقال جرم و حرارتی دارد که در ساختار محصول اتفاق می افتد و فقط از طریق درک و تحلیل فرآیندهای انتقال می توان به حداکثر بازده رسید. انتخاب روش مناسب جهت خشک کردن و رسیدن به یک خشک‌کن مناسب جهت بهینه سازی و انجام فرایند با حداکثر بازده انتقال حرارت، یکی از مباحث مهم در طراحی میباشد. محصولات بسیار زیادی وجود دارند که لازم است فرایند خشک کردن روی آن انجام گیرد که خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متمایزی دارند، از طرف دیگر طرق مختلفی وجود دارند که بتوان به ماده مورد نظر حرارت را انتقال دهیم. تنوع زیاد محصولاتی که در صنایع مختلف باید خشک شوند موجب طراحی انواع مختلفی از خشک‌کن ها شده است (R.B. keey, 1972). در این بین خشک‌کن چرخشی یکی از خشک‌کن هایی می باشد که برای خشک کردن در مقیاس بالا، به دلیل بازده حرارتی

بالای آن، مورد توجه قرار گرفته است. اغلب خشک کن های چرخشی موجود در صنایع تولیدی دارای سیکل حرارتی باز بوده، که این سیکل بازده حرارتی را به طور چشمگیری کاهش می دهد. امروزه مطالعات زیادی برای ایجاد سیکل های حرارتی مختلف در خشک کن ها به منظور افزایش بازده آن در حال انجام است (Magdalini, 2006). در این پژوهش با ایجاد سیکلی نوین در مقایسه با مدل های آزمایشگاهی مشابه، توانستیم بازده حرارتی خشک کن را در مقیاس آزمایشگاهی به مقدار قابل توجهی افزایش دهیم.

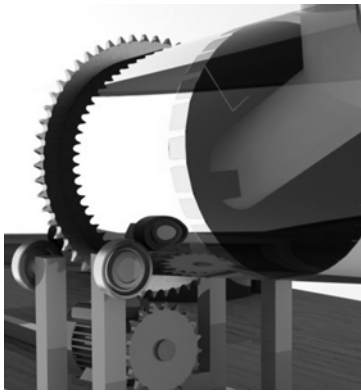


شکل (۱) اجزای یک خشک کن چرخشی با سیکل بسته (مدل طراحی شده با نرم افزار solidworks 2010).

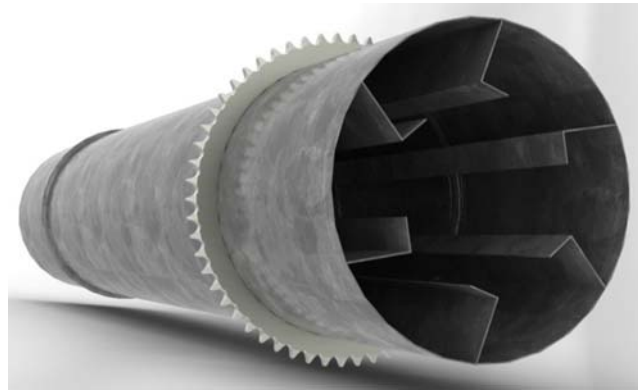
## ۲- مواد و روش ها

از میان انواع خشک کن های چرخشی مطالعات بیشتری بر روی خشک کن های چرخشی (شکل ۱) حرارت مستقیم مجهز به پره انجام شده است. این خشک کن در مدل آزمایشگاهی بوده و شامل استوانه ای میباشد که در جهت مناسب میچرخد و دارای ۶ پره بوده (شکل ۲) و به طور معمول با افق زاویه ای کم به سمت خروجی محصول میسازد. طول استوانه ۱ متر و قطر آن ۰/۲ متر میباشد ( $\frac{L}{D} = 5$ ). مواد جامد به انتهای هر سیلندر وارد شده و به واسطه سه خاصیت حرکت چرخشی توسط سیستم چرخ زنجیر (شکل ۳)، اختلاف ارتفاع و شیب استوانه، محصول تغذیه شده از قسمت دیگر تخلیه میشود. هنگامی که استوانه می چرخد پره های بالا برنده مواد جامد را بالا میبرند و به داخل هوای داغ در حال جریان می پاشد و در نتیجه سطح مواد جامد به طور کامل در معرض هوای داغ قرار گرفته و عمل خشک شدن به طور موثرتری انجام میگردد. در محیط های مرطوب لازم است که هوای خنک ورودی تا حدی رطوبت زدایی شود که این کار را می توان توسط برج جذب و در مجاورت کلسیم کلراید انجام داد، ولی در طراحی این سیستم از یک سیکل بسته استفاده شده است که رطوبت محصول و هوای داخل سیکل، با آزمایشات انجام گرفته بر روی محصولات مختلف، پس از طی چند سیکل توسط سیستم برج جذب گرفته شده و در سیکل

های بعدی رطوبت جذب شده توسط برج ، رطوبت خالص محصول می باشد، که بایستی از آن خارج شود و از جذب مجدد رطوبت ممانعت به عمل می آید (شکل ۴). دستگاههای فرعی این خشک کن عبارتند از: گرمکن هوا ، کانال تنظیم کردن مقدار هوا، سیستم توزیع یکنواخت هوا ، سیستم تزریق رطوبت ( جهت تنظیم رطوبت نهایی محصول خشک شده) و سنسورهای کنترل رطوبت و دما می باشند.



شکل (۳) انتقال توان از موتور به استوانه



شکل ( ۲ ) استوانه و پره ها



شکل (۴) محفظه آرامش

## اصول طراحی خشک کن چرخشی

### a. موازنه جرم

- مقدار وزن هوای خشک ( $W_E$ ) در جریان هوای تر ( $W_E$ ) در فرایند خشک کردن ثابت می ماند. رطوبتی که به خشک کن وارد می شود شامل رطوبت های زیر است:
- رطوبتی که توسط ماده تر وارد می شود  $X_1$  و  $W_{m1}$
- رطوبتی که توسط هوا وارد می شود  $Y_0$  و  $W_E$
- رطوبتی که از خشک کن خارج می شود عبارت است از :
- رطوبتی که توسط مواد خشک خارج می شود  $X_2$  و  $W_{m2}$
- رطوبتی که توسط برج جذب گرفته می شود  $Y_2$  و  $W_E$

در شرایط پایدار جرم رطوبت ورودی به خشک‌کن باید با جرم رطوبتی که از خشک‌کن خارج می‌شود برابر باشد. باید به این نکته توجه کرد که در این خشک‌کن هوا تجدید نمی‌شود و مقدار رطوبت ورودی ثابت می‌ماند؛ در حالت کلی داریم:

$$W_{m1}X_{\square 1} + W_B Y_0 = W_{m2}X_{\square 2} + W_B Y_2 + W_B Y_0 \quad (1)$$

$$W_{m1}X_{\square 1} + W_{m2}X_{\square 2} = W_B Y_2 \quad (2)$$

جرم رطوبت تبخیر شده در خشک‌کن برابر است با طرف چپ معادله ۲:

$$W_A = W_{m1}X_{\square 1} - W_{m2}X_{\square 2} = W_B Y_2 \quad (3)$$

بنابراین جرم هوای خشک جاری شده به درون خشک‌کن در واحد زمان و یا به عبارتی هوای مصرفی مخصوص را از رابطه زیر می‌توان بدست آورد:

$$W_B = \frac{W_A}{Y_2} \quad (4)$$

هوای مصرفی برای تبخیر ۱ kg رطوبت (هوای مصرفی مخصوص) در خشک‌کن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{W_B}{W_A} = \frac{1}{Y_2} \quad (5)$$

#### b. موازنه انرژی

موازنه انرژی برای خشک‌کن به دلیل مداوم بودن آن، بر اساس واحد زمان (KJ/S) صورت می‌گیرد. هوای داخل خشک‌کن قبلاً در یک پیش گرم کننده حرارت می‌بیند و علاوه بر آن مقداری حرارت هم در داخل خشک‌کن ممکن است به آن داده شود. حرارت‌های که به سیستم خشک‌کن داده می‌شود عبارت است از:

- حرارت توسط گرمکن خارجی  $Q_{ext}$

- حرارت توسط مواد تر  $W_{m1} C_{m1} T_{m1}$

چون دبی جرمی مواد در ابتدای ورود به خشک‌کن برابر است با مجموع دبی جرمی مواد در خروج از خشک‌کن به علاوه تبخیر رطوبت از ماده؛ بنابراین حرارتی را که توسط ماده تر وارد خشک‌کن می‌شود می‌توان محاسبه کرد:

$$W_{m2} C_{m2} T_{m2} + W_A C_{AL} T_{m1} \quad (6)$$

عوامل حرارت‌های دیگری که به خشک‌کن وارد می‌شوند عبارتند از:

- قسمتهایی که کار حمل مواد را به داخل خشک‌کن حمل می‌کنند،  $W_f C_f T_{f1}$

- گرمکن‌های داخلی،  $Q_{int}$

و عوامل حرارت‌هایی که از خشک‌کن خارج می‌شوند:

- رطوبت خروجی از خشک‌کن،  $W_B I_1$ ؛

- مواد خشک خروجی،  $W_{m2} C_{m2} T_{m2}$ ؛

- وسایل حمل مواد به خارج از خشک‌کن،  $W_f C_f T_{f2}$ ؛

- تلفات حرارتی،  $Q_L$ .

در شرایط پایدار داریم :

(۷)

$$Q_{ext} + W_{m2} C_{m2} T_{m1} + W_A T_{m1} C_{AL} + W_f C_f T_{f1} + Q_{int} = W_B I_l + W_{m2} C_{m1} T_{m2} + W_f C_f T_{f2} + Q_L \quad (7)$$

حرارت مورد نیاز فرایند خشک شدن:

(۸)

$$Q = Q_{ext} + Q_{int} = W_B I_l + W_{m2} C_{m1} (T_2 - T_1) + W_f C_f (T_{f2} - T_{f1}) + Q_L - W_A T_{m1} C_{AL}$$

جملات سمت راست معادله ۸ عبارتند از :

$W_B I_l$ : حرارت گرفته شده توسط کندانسور

$Q_m = W_{m2} (C_{m1} T_2 - C_{m2} T_1)$ : حرارت استفاده شده برای گرم شده ماده

$Q_f = W_f C_f (T_{f2} - T_{f1})$ : حرارت استفاده شده برای گرم شدن وسایل حمل مواد

$W_A T_{m1} C_{AL}$ : حرارت اعمال شده به خشک کن توسط آب ماده

$Q_L$ : اتلاف حرارت در خشک کن که با سطح خشک کن و اختلاف درجه حرارت سطح داخلی و خارج آن

متناسب

(۹)

$$Q_L = \sum A_i K_i \Delta T_i$$

که در آن  $A_i$  المان سطح خشک کن و  $K_i$  ضریب کلی انتقال حرارت در سطح المان خشک کن و اختلاف درجه حرارت در دو سطح داخلی و خارج خشک کن است. با استفاده از علائم بالا برای جملات معادله مقدار حرارت گرمکن خارجی از رابطه زیر بدست می آید:

(۱۰)

$$Q = W_B I_l + Q_m + Q_f + Q_L + Q_{int} - W_A T_{m1} C_{AL}$$

از این معادله برای بدست آوردن گرمای مصرفی در گرمکن خارجی استفاده می شود.

حرارت مصرفی برای تبخیر ۱ kg از رطوبت ماده در خشک کن،  $q_{ext}$ ، (حرارت مصرفی مخصوص) از رابطه زیر می توان تعیین کرد:

(۱۱)

$$q_{ext} = \frac{Q_{ext}}{W_A} = \frac{W_B}{W_A} I_l + \frac{Q_m + Q_L + Q_f - Q_{int} - W_A T_{m1} C_{AL}}{W_A}$$

### c. انتقال حرارت

مقدار گرمای منتقل شده در خشک کن چرخشی حرارت مستقیم با معادله زیر بیان می شود:

(۱۲)

$$Q = U_v a V (\Delta t)_m$$

که  $Q$  شدت انتقال حرارت (j/s)،  $U_v a$  ضریب انتقال حرارت حجمی ( $j/sm^3k$  یا  $w/m^3k$ )،  $V$  حجم خشک کن ( $m^3$ ) و  $(\Delta t)_m$  اختلاف دمای میانگین بین گازهای داغ و ماده می باشد.

سرعت کلی انتقال حرارت تحت تاثیر تعداد پره ها در معادله زیر آمده است (Myklestad, 1962):

برای ۶ پره:  $Q = 1.02LD \frac{(n_f - 1)}{2} G^{0.46} \Delta t_{lm}$  (۱۳)  
 با مقایسه رابطه بالا با معادله کلی انتقال حرارت می توانیم ضریب حجمی را بیان کنیم:

$$U_{va} = 0.652(n_f - 1)D^{-1}G^{0.46} \quad (14)$$

برای ۶ پره:

سرعت انتقال حرارت مستقل از شیب و سرعت چرخش استوانه می باشد و بنابراین مستقل از زمان ماندن است، همچنین از اندازه پره ها نیز مستقل است. افزایش سرعت جریان گاز بازدهی خشک کن را افزایش می دهد. چون  $n_f \gg 1$  می باشد، معادله ساده زیر را می توان بکار برد (Friedman and marshall, 1949):

$$U_{va} = K_s G^{0.46} \quad (15)$$

که در آن  $K_s$  ثابت هندسی بوده،  $4.3 \leq K_s \leq 6.4$ ، و  $G$  سرعت جرمی هوای داخل خشک کن است.

تحلیل بالا دارای سه ساده سازی می باشد و نمی تواند مقدار دقیق انتقال حرارت را برای یک سیکل باز پیشگویی کند: چون اولاً مقدار حرارت از دست رفته توسط خشک کن محاسبه نشده ثانیاً استفاده از اختلاف دمای میانگین لگاریتمی ( $\Delta t_{lm}$ ) درست نیست، چرا که دمای جامدات به صورت خطی با دمای گازها تغییر نمی کند و سوم اینکه آنها شک و تردیدهایی برای همبستگی بین سرعت انتقال حرارت و تعداد پره ها بیان کردند؛ در این سیکل بدلیل عدم صدق موارد بالا در آن، رابطه را می توان با ضریب اطمینان بالایی بکار برد. سرعت چرخش اثر کلی روی  $U_{va}$  دارد بطوری که اثر مخالفی روی وقفه و سرعت آبشاری ریختن دارد. معادله بالا به شکل زیر هم نوشته می شود (Friedman and marshall, 1949):

$$U_{va} = KG^n/D \quad (16)$$

که  $K$  ثابت است،  $G$  سرعت جرمی هوا ( $kg/m^2h$ )،  $D$  قطر خشک کن ( $m$ ) و  $n$  ثابت است. طبق آزمایشات مارشال و همکاران  $k=44$  و  $n=0.16$  است. ضریب انتقال حرارت را بر اساس واحد طول خشک کن بکار گرفتند بنابراین:

$$Q = U_L \alpha L \Delta t_m \quad (17)$$

که  $U_L \alpha$  بر حسب  $W/mk$  است. دو ضریب  $U_{va}$  و  $U_L \alpha$  مربوط به معادله زیر هستند:

$$U_L \alpha = \frac{\pi D^2}{4} U_{va} \quad (18)$$

d. مدت زمان وقفه

مدت زمان وقفه به وسیله معادله زیر بدست می آید:

$$\bar{\tau} = \frac{M}{F_s} \quad (19)$$

$F_s$  = نرخ تغذیه محصول

$M$  = وزن کل محصول در خشک کن که متناسب است با میزان ماندن محصول درون خشک کن ( $H$ ) که به وسیله معادله زیر بدست می آید:

$$M = (1 - \epsilon) \rho_g H \quad (20)$$

$\varepsilon =$  تخلخل ،  $\rho_p =$  دانسیته

معمولا زمان ماندن (زمان وقفه) در یک خشک کن چرخشی تابع طول، قطر، شیب و سرعت چرخش است که به وسیله معادله زیر ارتباط بین این پارامترها بیان می شود (Kisakurek, 1982):

$$\bar{\tau} = \frac{KL}{ND_S} \quad (21)$$

### e. محاسبه ابعاد خشک کن

ابعاد خشک کن بستگی به نیازهای ساختاری بخصوصی دارد که در هر خشک کن لازم است توسط مهندس طراح در نظر گرفته شود. در محاسبات فرایند فقط با ابعاد قسمت فعال محفظه ی خشک کن سروکار داریم (C.Strumilo, T.Kudra, 1986).

### I. محاسبه حجم

برای محاسبه حجم از رابط زیر استفاده شده است:

(الف)

$$V = \frac{Q_t}{U_a \Delta T_m} \quad (22)$$

$$U_a = \frac{10 G^{0.16}}{D}$$

در واقع با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده رابطه زیر باید در این خشک کن برقرار باشد:

$$\Delta T_m = 28.25 \text{ و } Q_t = VI = 2 \times 220 = 440 \text{ وات}$$

با توجه به جریان ۲ آمپری گرم کن داریم: مقادیر  $\Delta T_m$  باید تنظیم گردند.

ب) با توجه به زمان وقفه محصول مورد نظر هم می توان حجم را به دست آورد:

$$V = \frac{\bar{\tau} F_S}{H \rho_S} \quad (23)$$

$Q_t$ : نرخ انتقال انرژی

$U_a$ : ضریب انتقال حرارت

$\Delta T_m$ : اختلاف درجه حرارت بین گازهای داغ و محصول

$G, F_S$ : به ترتیب نرخ انتقال جرمی محصول و هوا

$D$ : قطر محفظه ی خشک کن

$V$ : حجم محفظه ی خشک کن

$\bar{\tau}$ : زمان توقف محصول در خشک کن

### II. محاسبه سطح و قطر

برای تخمین قطر خشک کن (D) باید دو نکته را مورد توجه قرار داد:

- سرعت جرمی هوا باید آنقدر باشد که باعث محبوس شدن محصول نشود.
- این نکته باید در طراحی قطر استوانه در نظر گرفته شود که تنها بخشی از قطر استوانه برای عبور هوا است.

بنابراین قطر استوانه به وسیله معادله زیر محاسبه می شود:

$$D = \sqrt{\frac{4G}{3850\pi J_u}} \quad (24)$$

$J_u$ : درصدی از سطح مقطع خشک کن که جریان هوا از آن عبور میکند. در این مدل بین  $G$  و  $J_u$  همیشه

$$G = 113.04 J_u$$

باید رابطه مقابل برقرار باشد:

### III. محاسبه ضخامت

مقدار ضخامت از رابطه مقابل بدست می آید:

$$e = \frac{P_i \times D}{2f - P_i} \quad (25)$$

$e$ : mm	مینیمم ضخامت
$P_i$ : mm <sup>2</sup>	فشار داخلی
$D$ : mm	قطر خشک کن
$f$ : N/mm <sup>2</sup>	تنش معادل

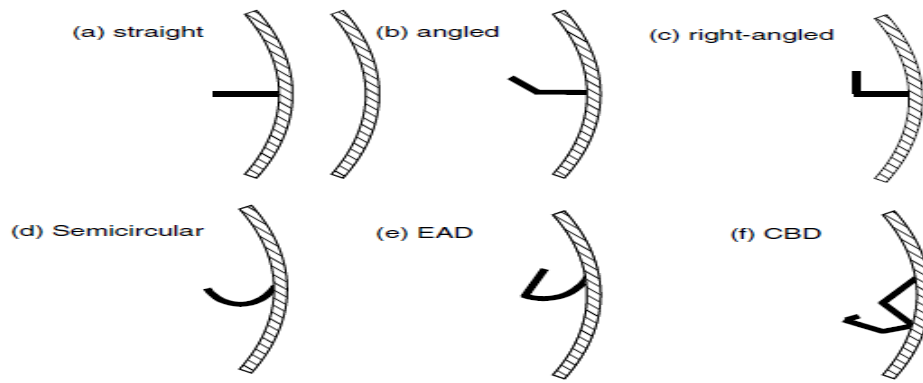
با اعمال تنش نهایی  $f_u = 350 \text{Mpa}$  و  $P_i = 100 \text{kpa}$  و  $D = 0.2 \text{m}$ ، مینیمم مقدار ضخامت برابر است با:

$$e = 0.03 \text{mm}$$

### IV. طراحی پره ها

هدف ما از این پره ها بلند کردن و پخش کردن ذرات جامد در میان جریان گاز به منظور افزایش سطح تماس مواد مرطوب و گاز داغ است شکل پره ها به مشخصات ماده جامد بستگی دارد. پروانه های شعاعی با زاویه ۹۰ درجه که برای مواد با جریان آزاد استفاده می شوند، نصب شدند و پره های صاف بدون لبه برای مواد چسبناک استفاده می شوند. یکی از راه های طراحی پره ها تطابق آن با مشخصات ماده خشک شونده است (Poersch, 1971). عمومی ترین پره هایی که در خشک کن های چرخشی استفاده می شود در شکل زیر آمده است (Magdalini Krokida, 2002).

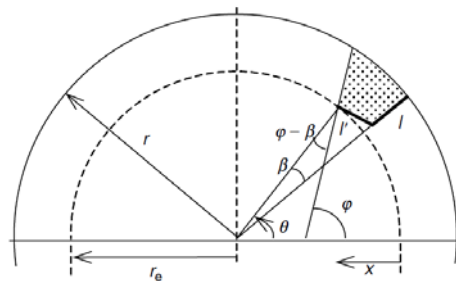




شکل (۵) انواع پره های عمومی (ارئه شده توسط Magdalini Krokida و همکاران)

پره های a، b، c و d نشان داده شده در شکل بالا بیشتر برای خشک کن های چرخشی آبشاری استفاده می شود، که چون متناسب با هدف ما بود از آن استفاده کردیم. پره a برای مواد چسبناک مناسب است. شکل چهارم d که به شکل نیم دایره است بوسیله Purcell, 1971 پیشنهاد شده است. ساخت این نمونه در مقایسه با نمونه های b و c راحت تر است.

دو مدل e، f بر اساس یک تئوری برای بهبود کارایی خشک کن ها طراحی شده اند (Kelly, 1969)، ولی شکل آنها پیچیده تر از سایر پره ها می باشد. برای اطمینان از بسته شدن کامل و بهینه یک خشک کن، دانستن مقدار ماده جامدی که در پره ها جا می گیرند، اهمیت زیادی دارند. اگر پره ها کاملاً پر شده باشند، کارایی خشک کن کاهش می یابد؛ چراکه پر شدن استوانه تحت تاثیر انتقال مواد به وسیله کوره و میزان تماس مواد با گاز داغ می باشد در نتیجه زمان ماندن ماده جامد کاهش یافته و ممکن است کیفیت محصول کاهش یابد. مواد باقی مانده روی پره ها دارای موقعیت هندسی و زاویه ای هستند و زاویه  $\phi$  میان سطح افق و سطح آزاد مواد جامد در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۶) زاویه پره ها

Schfield & Glikin این زاویه ( $\phi$ ) را با موازنه نیروی فعال روی یک ذره که از یک پره سقوط می کند را حساب کردند. نیروی جاذبه ( $\phi_g$ )، نیروی گریز از مرکز ( $\phi_c$ ) و نیروی اصطکاک ( $\phi_f$ ) روی ذره اثر دارد. نیروی اصطکاک حاصل ضریب اصطکاک دینامیکی ( $\gamma$ ) ذره ای است که به سمت پایین سرازیر می شود؛ که این ضریب اصطکاک حاصل واکنش ذرات روی سطح هم ( $\phi_n$ ) است. زاویه سطح محصول از فرمول زیر بدست می آید:

$$\tan \phi = \frac{\gamma + \nu(\cos \theta - \gamma \sin \theta)}{1 - \nu(\sin \theta + \gamma \cos \theta)} \quad (26)$$

که زاویه ای است که از امتداد لبه پره به مرکز استوانه بدست می آید.  $\nu = r_e \omega^2 / g$  که حاصل نسبت نیروی گریز از مرکز به نیروی جاذبه است که به ذره اثر می کند. خشک کن های چرخشی معمولاً در  $0.0025 \leq \nu \leq 0.04$  کار می کنند بنابراین معادله بالا نتایج دقیقی را در دامنه بالاتر از نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی بیان می کند.

#### f. طراحی برج جذب کننده و سیستم کنترل رطوبت و دما

شکل شماتیک این قسمت در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل کندانسور، گرمکن، سیستم کنترل دما و رطوبت در یک محفظه (محفظه آرامش) قرار داده شده اند. در سیستم های آزمایشگاهی مشابه از ۲ تا کندانسور در شکل کولر گازی استفاده می شد، که اولی هوای برگشتی را خنک کرده و دومی باعث تقطیر بخار موجود در هوای برگشتی می شد. در سیستم قبلی با یک بار عبور رطوبت هوا گرفته می شد. بازده حرارتی این سیستم بسیار پایین بوده و در بسیاری از موارد سیکل باز ترجیح داده می شود. در طراحی این خشک کن از یک کندانسور کوچک استفاده شده است، که به تدریج رطوبت را جذب کرده و پس از ۲ الی ۳ بار گردش هوا کار سیستم قبلی را انجام می دهد (شکل ۷) در حالی که در سیستم قبلی به جریان ۱۶ آمپر به ازای هر کندانسور مورد نیاز بود و در این سیستم، در مجموع، به جریان ۲ آمپر نیاز داریم با توجه به اینکه  $V = 220$ ، اگر بخواهیم مقایسه ای بین این دو انجام دهیم خواهیم داشت:

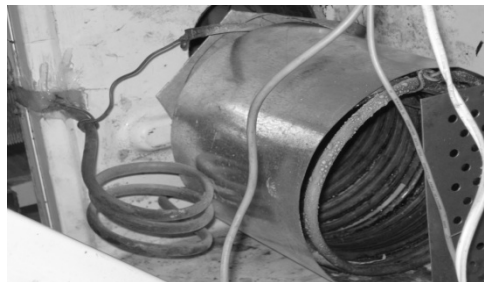
$$P = VI$$

(۲۷)

در خشک کن کولر دار:  $P = 9.6hp$

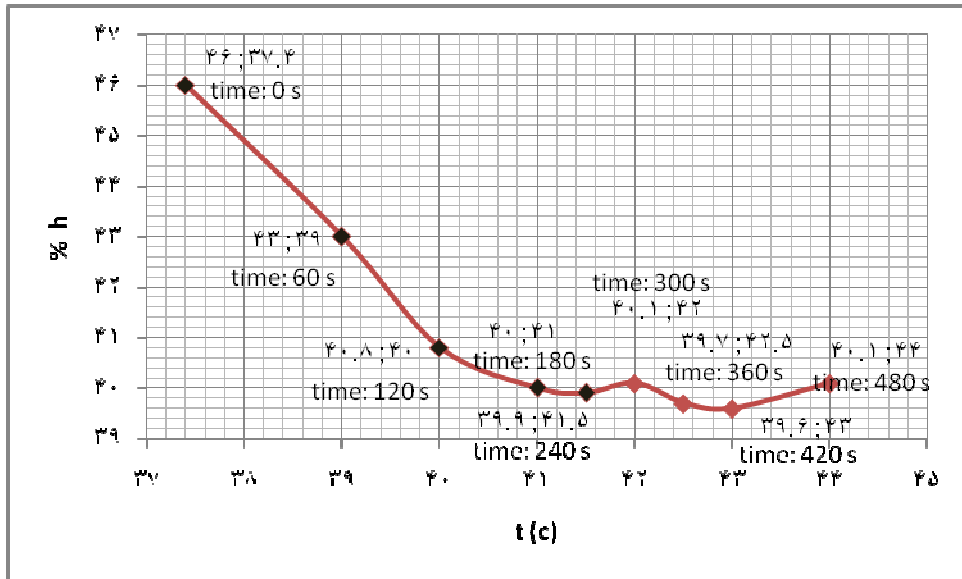
در خشک کن ساخته شده:  $P = 0.6hp$

پس از محاسبه، مشاهده شد که، مقدر توان مورد نیاز در این سیستم ۹۳٪ از نوع مشابه آن کمتر است و این همان چیزی بود که ما دنبال آن بودیم.



شکل (۷) کندانسور واقع در محفظه آرامش

وقتی رطوبت خشک کردن به مقدار مطلوب رسید، سیستم کنترل رطوبت، که از نوع ۲ رله ای می باشد، جریان کندانسور را قطع کرده و سیستم تزریق رطوبت را تا رسیدن آن به حد مورد نظر فعال می کند و پس از اینکه به حد مطلوب رسید، مجدداً جریان کندانسور را وصل کرده و سیستم تزریق رطوبت را از کار می اندازد. در نتیجه رطوبت همیشه در یک محدوده مشخص نگه داشته می شود. کنترل دما هم بوسیله سنسور مربوطه قابل کنترل می باشد. نمودار زیر روابط بین زمان، رطوبت و دما که در یک محدوده آزمایشی دلخواه بر روی محصول کلزا ثبت شده اند، را نشان می دهد.



شکل (۸) رابطه بین زمان ، رطوبت و دما در توده هوای داخل خشک کن

g. محاسبه توان

توان مورد نیاز برای خشک کن از رابطه زیر بدست می آید :

$$\text{BHP} = \frac{N \times (4.75 d[w] + 0.1925 DW + 0.33W)}{100,000} \quad (28)$$

D :	قطر خارجی پوسته استوانه	BHP :	توان مورد نیاز
[w]:	وزن مواد	N: rpm	سرعت دورانی
W :	وزن مواد + وزن عایق + وزن سیستم محرکه	d:	قطر داخلی پوسته استوانه

توان الکتریکی ( $h_p$ ) برای استوانه چرخشی از معادله زیر بدست می آید:

$$h_p = qND(M+W') \quad (29)$$

که در این معادله q ثابت تجربی معادله و  $W'$  وزن خشک کن است که با توجه به خصوصیات هندسی خشک کن به وسیله معادله زیر بدست می آید:

$$W' = \rho_M \left( \frac{2\pi D^2}{4} + \pi DL \right) dx \quad (30)$$

که در این معادله dx ضخامت دیواره خشک کن (m) و  $\rho_M$  دانسیته فلز مورد استفاده در ساخت خشک کن است.

### ۳- بحث و نتیجه گیری

در طراحی خشک کن با توجه به استفاده آن برای محصولات مختلف، روابط به صورت کلی بیان شده است. در طراحی ابعادی روابطی بین پارامترهای مختلف بدست آمد، که از مهمترین آن می توان به رابطه  $\frac{L}{D} = 5$  اشاره کرد که متناسب با ماکزیمم بازده خواهد بود. در طراحی برج جذب توانستیم با توجه به سیکل های ترمودینامیکی و روابط انتقال حرارت، انرژی مورد نیاز خشک کردن را به مقدار قابل توجهی کاهش دهیم. کنترل رطوبت، دما، سرعت چرخش استوانه و سرعت جریان هوا از دیگر ویژگی های این دستگاه می باشد که اگر در تمامی سیستم های مشابه بکار گرفته شود، کاهش چشمگیری در مصرف انرژی خواهد شد. سیستم کنترل رطوبت هم بسیار ساده طراحی شده است، که با توجه به نمودار شکل (۸) به صورت نوسانی تا محدوده بسیار کوچک قابل کنترل خواهد بود.

### ۴- منابع و مأخذ

- (۱) استرامیلو، سزلا. کودرا، تادیوز. خشک کردن، اصول کاربرد و طراحی. ترجمه حسن پهلوان زاده، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. ۱۳۷۷.
- (۲) سمیع پور، محمد. ترمودینامیک. انتشارات پوران پژوهش. ۱۳۸۷.
- 3) Iguaz, A . & Esnoz, A. & Mart, G. 2000. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer.
- 4) Revol, D. & Briens, C.L. 2000. The design of flights in rotary dryers.
- 5) Key, R B. 1972. drying principle and practice pergamon, london
- 6) Krischer, O. 1956. die wissenschaftliche grundlagen der trocknungstechnik. springer-verlag, berlin.

## Design and construction of a closed-cycle rotary dryer For optimization of energy consumption and moisture control

### Abstract

In this project, we designed and constructed a closed-cycle rotary dryer to consider energy optimization and humidity control which is very important in industrial plants of food processing and post-harvest technology. Firstly, we calculated the mass and energy balance, heat transfer, remaining time, dryer dimensions and the required power to run the dryer. Then a closed-cycle system was designed for this dryer including a moisture absorption tower, temperature and moisture control unit, drum rotation control unit and air recirculation control unit. Therefore, we could recycle the drying air to minimize the heating energy consumption. This dryer can be applied for medicinal plants, grains and many other agricultural products.

**Keywords:** Rotary dryer, design, closed cycle, moisture control, optimization.