

## طراحی، ساخت و ارزیابی خشک کن پاششی آبمیوه

\* برات قبادیان

\*\* غلامرضا چگینی

\*\*\* تیمور توکلی هسجین

### چکیده

در این تحقیق برای به دست آوردن داده‌های اولیه طراحی، آزمایشاتی با خشک کن پاششی آزمایشگاهی بر روی آب پرتقال انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که برای خشک کردن آب پرتقال مناسب‌ترین دمای تغذیه هنگام پاشش  $35^{\circ}\text{C}$  -  $20^{\circ}\text{C}$ ، دمای هوای خروجی  $70^{\circ}\text{C}$ ، بیشترین دمای هوای ورودی  $17^{\circ}\text{C}$  و دمای نقطه چسبندگی پودر با رطوبت ۲٪،  $44^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. همچنین عامل مهم در ایجاد رسوب پودر بر روی دیواره‌های خشک کن دمای بالای دیواره‌ها می‌باشد. با این نتایج یک خشک کن پاششی دوجداره با ظرفیت  $15\text{ kg/h}$  پودر برای آبمیوه طراحی، ساخته و ارزیابی شد. خشک کن ساخته شده قابلیت کنترل پارامترهای دمای دیواره محفظه خشک کن، دمای هوای ورودی و خروجی و دور اتمایزر را دارد. ارزیابی خشک کن نشان می‌دهد که عملکرد خشک کن در دمای هوای ورودی مختلف بین ۶۵ تا ۹۰٪ و رسوب دیواره‌ها کمتر از ۱۵٪ می‌باشد. در تمام آزمایشات، دمای دیواره‌های محفظه کمتر از دمای نقطه چسبندگی پودر بود و رسوب دیواره‌ها نسبت به خشک کن آزمایشگاهی به میزان قابل توجهی کاهش یافت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای دمای هوای ورودی و نرخ تغذیه به صورت مستقل و در کنار هم اثر معنی داری بر عملکرد خشک کن و رسوب دیواره دارند. در دمای هوای ورودی ثابت با افزایش نرخ تغذیه، عملکرد کاهش و رسوب دیواره‌ها افزایش می‌یابد.  
واژه‌های کلیدی: خشک کن پاششی، پودر آبمیوه، طراحی، ساخت و ارزیابی.

\* - استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*\* - دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*\*\* - دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۳/۱۲ تاریخ دریافت نسخه نهایی ۱۳۹۴/۱۰/۱۲

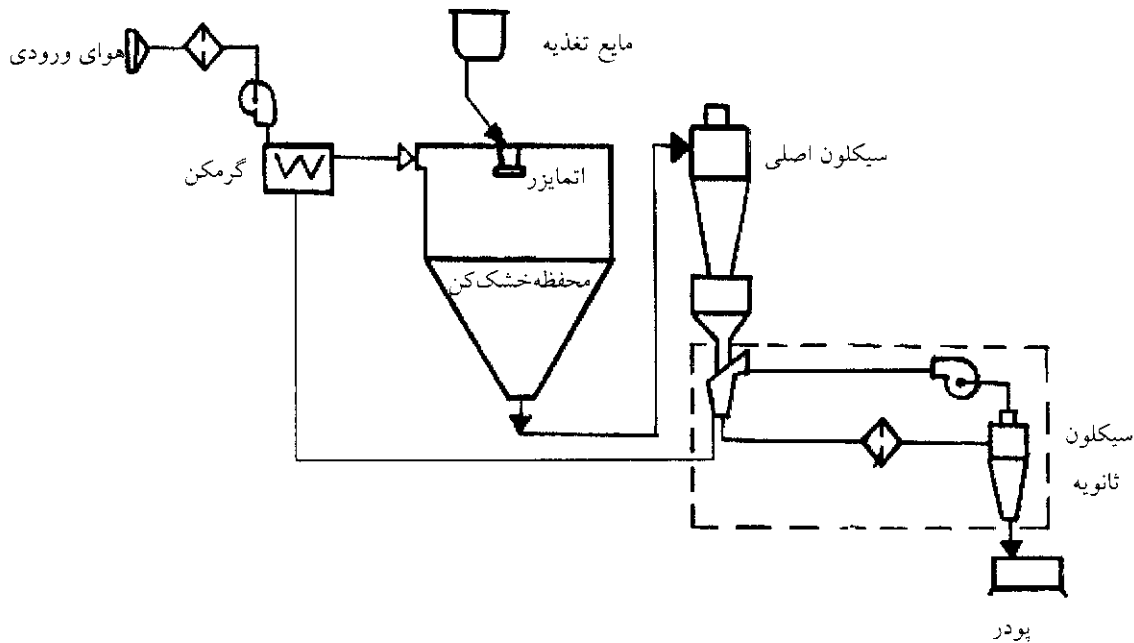
## ۱- مقدمه

استفاده از آرمیوه‌ها به صورت طبیعی همواره مشکلات و ضایعات زیادی به علت نگهداری و حمل و نقل به همراه داشته است. قابلیت مصرف در شرایط زمانی مختلف و انتقال راحت پودر آرمیوه‌ها و کاربرد بسیار زیاد آن در صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی به عنوان مواد اولیه دیگر محصولات از مواردی بوده که تولیدکنندگان و محققین را به سمت تولید پودر آرمیوه‌ها سوق داده است (۲۲). آبرگیری از آرمیوه‌ها برای تولید پودر یکی از مشکل‌ترین روش‌های خشک کردن مواد غذایی می‌باشد. این مواد به دمای زیاد حساس بوده و سریعاً تخریب می‌گردند. هنگام خشک کردن آرمیوه‌ها ترکیبات آبدوست آنها با خصوصیات ترموپلاستیکی ترکیب شده و باعث افزایش رسوب بر دیواره‌های مخزن و متعاقباً ایجاد مشکل در انتقال پودر می‌شود (۲۹، ۶).

یکی از خشک‌کن‌هایی که برای تولید پودر آرمیوه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است خشک‌کن پاششی<sup>۱</sup> می‌باشد. کیفیت پودر خشک شده در خشک‌کن پاششی تا حد زیادی تحت تأثیر نحوه پاشش مایع و انتقال جرم و حرارت بین مایع پاشیده شده و هوای گرم در داخل محفظه خشک‌کن قرار دارد. بنابراین طراحی یک سیستم خشک‌کن صحیح بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد از نکات مهم در طراحی آن می‌باشد (۱۳). با توجه به اینکه آرمیوه‌ها خصوصیات ترموپلاست و آبدوست دارند خیلی سریع بر روی دیواره‌های جانبی خشک‌کن رسوب می‌کنند بنابراین برای تولید پودر آرمیوه‌ها با خشک‌کن پاششی می‌بایست از وسایل اضافی دیگری در محفظه خشک‌کن نظیر: دیواره‌های خنک شده، هوای خنک‌کن ثانویه و جاروب هوایی استفاده نمود (۹، ۱۸). لازار خشک‌کن پاششی مخصوصی برای تولید پودر گوجه فرنگی بکار برد. این خشک‌کن دارای دو سیکلون بود و پودرها پس از تخلیه از سیکلون اولیه به سیکلون ثانویه انتقال داده می‌شد و دوباره با هوای گرم خشک می‌شدند. طرح شماتیک این خشک‌کن در شکل (۱) نشان داده شده است (۵).

کجرگارد نتیجه گرفت یکی از مشکل‌ترین محصولات می‌شود آب گوجه فرنگی است و پودر آن بسیار چسبنده می‌باشد که این به طبیعت ترموپلاستیکی و آبدوستی آن بر می‌گردد. او پیشنهاد داد که برای خشک کردن آب گوجه فرنگی با خشک‌کن پاششی استفاده از یک دیواره خنک شده مخصوص و کنترل دمای دیواره در یک حد مشخص به خشک کردن آن کمک می‌کند (۱۶).

دولینسکی و همکاران با اصلاح طراحی یک خشک‌کن پاششی و با استفاده از مواد افزودنی توانستند پودر مخلوط آب سیب- شیر تولید کنند. در خشک‌کن مذکور که محفظه آن به قطر ۲/۳ متر و ارتفاع ۵ متر بود با اصلاح طراحی رسوب دیواره‌ها را کاهش داده و اثر آبدوستی پودر را در سیستم جدا کننده به حداقل رساندند. در این خشک‌کن پودرهای تولید شده در ته محفظه خنک می‌شدند و از چسبندگی پودر به دیواره‌ها جلوگیری می‌شد (۹). کابانوف با اصلاح طراحی خشک‌کن پاششی از آن برای خشک کردن پوره یا خمیر آرمیوه استفاده نمود. در این تحقیق جاروبک‌های هوا در پایین محفظه خشک‌کن به همراه هوای خنک در دیواره به کار گرفته شد (۱۵).



شکل ۱- طرح خشک کن پاششی طراحی شده توسط لازار برای تولید پودر گوجه فرنگی

آب پرتقال یکی از آبمیوه‌هایی است که به خاطر وجود مواد آبدوست و اسیدی زیاد در ترکیبات آن، به سختی با خشک کن پاششی خشک می‌شود و پودرهای تولیدی به دیواره‌های محفظه چسبیده و رسوب سنگینی روی آن ایجاد می‌کند. همچنین پارامترهای کاری زیادی در خشک کردن آب پرتقال تأثیر دارند و می‌بایست این پارامترها در خشک کن پاششی کاملاً قابل تغییر و کنترل باشند.

هدف از این تحقیق طراحی و ساخت یک خشک کن نیمه‌صنعتی - آزمایشگاهی، با ظرفیت تولید پودر ۱۵ kg/h، و با قابلیت کنترل پارامترهای کاری به‌صورت آزمایشگاهی برای تولید پودر آب پرتقال می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

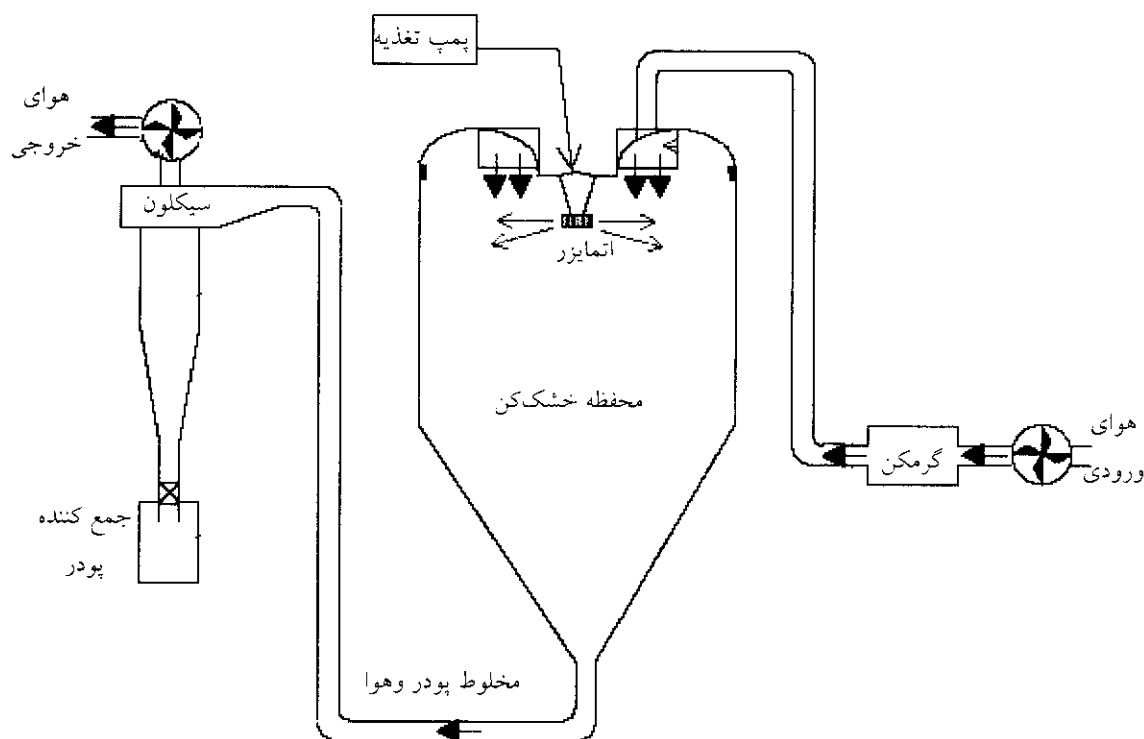
### ۲-۱ داده‌های اولیه طراحی

برای طراحی خشک کن پاششی داشتن اطلاعات دقیق از رفتار خشک شدن نظیر شرایط دمایی خشک شدن (دمای هوای ورودی و خروجی)، شرایط پاشش (مقدار و نرخ پاشش) و زمان اقامت و خصوصیات محصولی که می‌بایست خشک شود نظیر حساس بودن به گرما و چسبندگی مواد ضروری است. اطلاعات مذکور یا از نتایج تحقیقات قبلی و یا با استفاده از آزمایشات اولیه با خشک کن‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید (۱۰). بنابراین قبل از طراحی و ساخت خشک کن،

آزمایشات اولیه برای خشک شدن آب پرتقال انجام گرفت.

## ۲-۱-۱ مشخصات فرآیند

برای خشک کردن آب پرتقال از خشک کن پاششی آزمایشگاهی مدل Buchi، ساخت دانمارک استفاده شد که طرح شماتیک آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- طرح شماتیک خشک کن پاششی آزمایشگاهی

در این خشک کن مایع تغذیه توسط یک پمپ (با نرخ تغذیه ۴۲-۷/۵ ml/min) روی دیسک دواری با سرعت دورانی  $3000 \pm 2$  rpm انتقال داده می‌شود. هوای ورودی نیز توسط گرمکن برقی با محدوده دمایی  $200-80^\circ\text{C}$  از طریق یک توزیع کننده هوا با جریانی چرخشی وارد محفظه خشک کن می‌شود. خشک کن با استفاده از سیکلونی به قطر موثر ۱۰ cm مخلوط هوا و پودر خروجی را جداسازی می‌کند. دمای هوای ورودی و خروجی دور اتمایزر، نرخ تغذیه و دبی هوای ورودی با استفاده از سنسورها و نشانگرهای مربوطه اندازه گیری و نمایش داده می‌شود.

خشک کن در یک اتاق با شرایط محیطی ثابت قرار داده شد و تمام آزمایش‌ها در دمای هوای محیط  $25-20^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی ۲۵ تا ۳۰٪ (که با یک فن تهویه کنترل می‌شد) انجام گرفت. قبل از هر آزمایش شرایط هوای محیط با یک دماسنج و رطوبت سنج دیجیتال اندازه گیری می‌شد. در

تمامی آزمایشات پارامترهای دور اتمایزر در  $30000 \text{ rpm}$ ، دبی هوای ورودی در  $650 \text{ cm}^3/\text{s}$  و دمای تغذیه در  $25^\circ\text{C}$  ثابت نگه داشته شدند. آزمایشات اولیه روی آب پرتقال با درصد جامد  $50\%$  و با  $5$  سطح دمای هوای ورودی از  $130^\circ\text{C}$  تا  $170^\circ\text{C}$  و سه سطح نرخ تغذیه از  $20$  تا  $40 \text{ ml/min}$  و با  $3$  تکرار انجام شد.

نتایج حاصل از آزمایشات اولیه به شرح زیر آمده است:

- دمای هوای ورودی: دمای هوای ورودی با آزمایشات اولیه و براساس حساسیت محصول به دما و دمای آتش سوزی محصول انتخاب می شود. دمای هوای ورودی بیشینه به دست آمده از آزمایشات اولیه برای خشک کردن آب پرتقال  $170^\circ\text{C}$  است. دمای آتش سوزی برای مواد غذایی نیز حدود  $420^\circ\text{C}$  می باشد (۲۱). معمولا در طراحی خشک کن پاششی بیشترین دمای هوای ورودی ممکن را که کمتر از دمای آتش سوزی باشد در نظر گرفته می شود، بنابراین دمای هوای ورودی مورد نیاز در طراحی  $170^\circ\text{C}$  انتخاب می شود.

- دمای نقطه چسبندگی پودر<sup>۱</sup>: با توجه به حساسیت آب پرتقال به دما، در دمایی به نام دمای نقطه چسبندگی، پودر پرتقال به هم می چسبد که باعث تخریب و از بین رفتن محصول می شود. دانستن این دما در تعیین دمای دیواره های جانبی محفظه ضروری است (۱۴). دمای به دست آمده از آزمایشات تعیین دمای نقطه چسبندگی پودر در رطوبت برپایه خشک  $2\%$ ،  $44^\circ\text{C}$  به دست آمده است.

- دمای هوای خروجی: دمای هوای خروجی بر اساس درصد رطوبت مورد نیاز پودر و تخلیه راحت آن از محفظه انتخاب می شود و با میزان نرخ تغذیه کنترل می شود. متوسط دمای خروجی به دست آمده از آزمایشات اولیه برای تولید پودری با رطوبت  $2\%$ ،  $70^\circ\text{C}$  می باشد.

- زمان اقامت<sup>۲</sup>: مدت زمان لازم برای خشک شدن کامل محصول که معمولا برحسب متوسط زمان اقامت هوا (متوسط زمانی که هوای خشک شدن از لحظه ورود تا خروج از محفظه خشک کن طی می کند) فرض می شود و در طراحی اندازه محفظه خشک کن لازم می باشد (۳۰). برای آرمیوه ها این زمان  $10-20$  ثانیه به دست آمده است (۳، ۸). در آزمایشات اولیه خشک کردن آب پرتقال زمان اقامت برای خشک کردن تقریبا  $12\text{s}$  به دست آمد. بنابراین زمان لازم برای خشک کردن آب پرتقال بین  $12$  تا  $20$  ثانیه در نظر گرفته می شود.

- دمای مایع تغذیه: انتخاب دمای تغذیه باید طوری باشد که یک تعادل بین گرانیروی آب پرتقال و عدم خراب شدن آن وجود داشته باشد. زمانی که آب پرتقال هنوز به خشک کن پاششی انتقال نیافته است دمای تغذیه نباید از  $65^\circ\text{C}$  بیشتر شود (۱۲). اضافه کردن دما حتی برای مدت زمان کمی باعث از بین رفتن و تخریب محصول می شود. دمای تغذیه در زیر  $5^\circ\text{C}$  نیز انتقال و پاشش محصول را مشکل می کند. بنابراین برای انتقال راحت تغذیه، جلوگیری از خراب شدن و مناسب بودن گرانیروی مناسب ترین دمای تغذیه هنگام پاشش  $20-35^\circ\text{C}$  می باشد، در این دما مایع دارای ویسکوزیته خوبی

بوده و برای خشک شدن نیز به دمای کمتری نیاز دارد (۱۲).

### ۲-۱-۲ مشخصات کلی طراحی خشک کن

طراحی خشک کن پاششی مورد نظر در این تحقیق برای آب پرتقالی با درصد جامد تغذیه ۵۰٪ انجام گرفته است و هدف تولید پودر آب پرتقالی با درصد رطوبت باقیمانده ۴-۲٪ و به مقدار  $kg/h$  ۱۵ پودر می باشد. براساس این داده ها، ظرفیت تبخیر و نرخ تغذیه مورد نیاز خشک کن از روابط (۲۱) محاسبه می شوند.

$$P_p = E_v * S_f / (S_{po} - S_f) \quad (۱)$$

$$F = E_v * S_{po} / (S_{po} - S_f) \quad (۲)$$

با مقدار  $P_p$  پودر تولیدی برابر با  $۱۵ kg/h$ ،  $S_f$  جامد تغذیه برابر با ۵۰٪ و  $S_{po}$  جامد پودر برابر با ۳٪، ظرفیت تبخیر از رابطه (۱)  $kg_{H_2O}/h$  ۱۴ و نرخ تغذیه از رابطه (۲)  $kg/h$  ۱/۲۹ به دست می آید. البته شرایط فوق برای حداکثر کارایی خشک کن است و برای محصولات مختلف و با شرایط متفاوت فرق می کند.

### ۲-۲ طراحی اجزای خشک کن

#### ۲-۲-۱ طراحی محفظه خشک کن

وظیفه اصلی محفظه خشک کن، احاطه یا محصور کردن پاشش است. خیلی مهم است که قبل از اینکه قطرات خشک شوند به دیواره برخورد نکنند زیرا ایجاد رسوب در دیواره مشکلاتی نظیر پوسیدگی، آتش سوزی و عدم تمیزکاری مناسب ایجاد می کند. برای اتمایزرهای دوار معمولاً محفظه خشک کن قطور و با انتهای مخروطی یا تخت و برای اتمایزرهای نازلی باریکتر و بلندتر ساخته می شود (۲۱). علاوه بر موضوع اصلی حفظ پاشش، محفظه باید طوری طراحی شود که بتواند شرایط صحیح برای حفظ کیفیت مطلوب محصول را فراهم نماید. برای مثال خیلی از مواد حساس به دما، در مرحله نهایی خشک شدن که محصول تا حد زیادی رطوبت خود را از دست داده است، در معرض جریان هوایی با دمای زیاد از بین می روند. بنابراین نحوه جریان هوا و پاشش تغذیه در خشک شدن محصولات مختلف نقش بسزایی دارد (۱۰).

لازمه به دست آوردن ابعاد محفظه خشک کن مشخص کردن نوع سیستم جریان هوا- پاشش و محاسبه نرخ هوای خشک کردن و زمان اقامت می باشد (۱۹). با توجه به نوع محصول، سیستم جریان هوا- پاشش همسو انتخاب می شود و برای محاسبه نرخ هوای خشک کردن از موازنه جرم و حرارت در خشک کن استفاده می شود که به صورت رابطه (۳) می باشد.

$$L = \frac{[E_v (\lambda + 0.46 (T_o - T_f)) + P_p C_p (T_p - T_f) + Q_L]}{0.245 (T_i - T_o)} \quad (۳)$$

که در این رابطه:

$$Q_L = kA (T_o - T_{amb}) \quad (۴)$$

الف- محاسبه انتقال جرم و حرارت

نرخ هوای خشک کن مجموع گرمای لازم برای تبخیررطوبت، گرم کردن پودر و افت های محفظه می باشد که به صورت زیر محاسبه می شود.

- گرمای مورد نیاز برای تبخیر با در نظر گرفتن گرمای نهان تبخیر ۵۹۵ Kcal/kg (۱۹). دمای هوای خروجی ۷۰°C و متوسط تغذیه ۲۵°C از رابطه (۵) ۸۶۸۱ Kcal/h به دست می آید.

$$H_E = E_v [\lambda + 0.46 (T_o - T_f)] \quad (۵)$$

- گرمای لازم برای گرم کردن پودر با گرمای ویژه پودر ۴۰ Kcal/kg °C، دمای تغذیه ۲۵°C و دمای پودر ۴۴°C از رابطه (۶) ۱۱۴ Kcal/h به دست می آید (۱۹).

$$H_p = P C_p (T_p - T_f) \quad (۶)$$

- درخشک کن های پاششی با جریان همسو و اتمایزر دوار نسبت ارتفاع به قطر محفظه خشک کن بین ۰/۶ تا ۱ می باشد (۱۹). با توجه به نمونه های موجود، محفظه خشک کنی با ابعاد ۱۲۵×۹۰ cm وزاویه مخروطی ۶۰° در نظر گرفته می شود. نسبت ارتفاع به قطر این محفظه ۰/۷۲ می باشد. بنابراین با سطح محفظه خشک کن ۳/۵ m<sup>2</sup> و جنس استیل مقدار ۹ kcal/m<sup>2</sup>h °C برای ضریب انتقال حرارت k مقدار افت حرارتی محفظه (Q<sub>L</sub>) از رابطه (۴) برابر ۱۴۱۸ kcal/h به دست می آید.

با قراردادن مجموع گرماهای فوق در رابطه (۳) نرخ هوای خشک کن برابر ۴۱۷ kg/h به دست می آید. نرخ هوای خروجی خشک کن نیز از رابطه (۷) برابر ۴۳۱ kg/h به دست می آید.

$$L_o = L + E_v \quad (۷)$$

با دمای هوای خروجی T برابر ۷۰°C چگالی هوا از رابطه (۸) ۱ kg/m<sup>3</sup> به دست می آید. در نتیجه حجم هوای خروجی V<sub>o</sub> برابر ۴۳۱ m<sup>3</sup>/h محاسبه می شود (۱۹).

$$\rho_a = \frac{۳۵۳ \times L_o}{(T + ۲۷۳)(۱/۶ E_v + L)} \quad (۸)$$

ب- زمان اقامت:

زمان اقامت خشک شدن از رابطه (۹) به دست می‌آید (۱۸،۳۰).

$$t_R = V / V_0 \quad (9)$$

با در نظر گرفتن ابعاد انتخابی خشک کن، حجم محفظه خشک کن با زاویه مخروطی  $60^\circ$  از رابطه (۱۰) برابر  $1/55m^3$  به دست می‌آید (۱۹).

$$V = 0.2886D^2(h + 7854/0 D) \quad (10)$$

با این حجم زمان اقامت خشک شدن از رابطه (۹)  $13s$  به دست می‌آید. این زمان اقامت با نتایج به دست آمده از آزمایشات اولیه و نتایج محققین مطابقت دارد (۸۳). بنابراین ابعاد انتخابی محفظه خشک کن با ارتفاع  $90cm$ ، قطر  $125cm$  و زاویه مخروطی  $60^\circ$  ابعاد مناسبی می‌باشد. برای جداره بیرونی نیز ابعاد با ارتفاع  $120cm$ ، قطر  $135cm$  و زاویه مخروطی  $60^\circ$  به دست آمد.

## ۲-۲-۲ گرمکن

گرمکن بر اساس نوع محصولی که می‌بایست خشک شود انتخاب می‌شود. با توجه به حساسیت آب پرتقال به گرما، گرمکن الزاما باید از نوع غیرمستقیم<sup>۱</sup> باشد. داده‌های اولیه مورد نیاز در طراحی گرمکن عبارتند از: حجم هوای لازم برای گرم کردن، دمای اولیه هوا و بیشترین دمایی که هوا می‌بایست گرم شود (۲۳،۲۷). مقدار حرارت یا بار حرارتی لازم برای گرم کردن هوا از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$Q = L C_{Pair} \Delta T \quad (11)$$

با توجه به افت‌های حرارتی اجزای مختلف خشک کن و مسیر عبور هوای گرم یک ضریب اطمینان  $1/5$  برای افت حرارتی در نظر گرفته می‌شود (۱). در این صورت نرخ هوای لازم برای گرم کردن  $L$ ، برابر است با نرخ هوای خروجی ضربدر  $1/5$  که برابر  $650kg/h$  به دست می‌آید. دمای هوای اولیه برابر حداقل دمای ناحیه قرارگیری خشک کن که  $20^\circ C$  و حداکثر دمای لازم برای خشک کن  $300^\circ C$  در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت گرمایی ویژه هوا از جداول مربوطه برابر  $kJ/kg^\circ C$   $1/02$  به دست می‌آید (۲). بنابراین مقدار بار حرارتی لازم برای گرمکن  $185640kJ/h$  به دست می‌آید.

مقدار بار حرارتی یا حرارت لازم برای گرم کردن هوای خشک کن به صورت واقعی با در نظر گرفتن راندمان گرمکن از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$Q_a = q / \eta \quad (12)$$

راندمان گرمکن‌های غیرمستقیم با سوخت گازوئیل یا گاز از جدول (۱) به دست می‌آید.



با توجه به دمای هوای خروجی  $30^{\circ}\text{C}$ ، راندمان گرمکن ۷۵٪ در نظر گرفته می‌شود. با احتساب راندمان، بارحرارتی گرمکن مورد نیاز خشک کن  $Q_a = 247520 \text{ kJ/h}$  به دست می‌آید. برای این گرمکن، مشعل  $85000 \text{ kcal/h}$  انتخاب می‌شود.

جدول ۱: راندمان ( $\eta$ ) گرمکن در دماهای مختلف (۱۹).

راندمان (%)	دمای هوای خروجی گرمکن ( $^{\circ}\text{C}$ )
۸۰-۸۵	۱۷۵-۲۵۰
۷۵-۸۰	۲۷۵-۳۲۵
۷۰-۷۵	۳۵۰-۴۰۰

### ۲-۲-۳ طراحی سیستم جدا سازی پودر

برای طراحی سیستم جدا سازی پودر از منابع (۷،۱۱،۱۷،۲۶) استفاده شده است. برای جداسازی پودر از هوای خروجی خشک کن پاششی می‌بایست یک سیستم جداسازی پودر تعبیه شود. یکی از این نوع سیستم‌ها سیکلون‌ها می‌باشند که در سطح گسترده‌ای برای جداسازی ذرات گرد و غبار بکار می‌روند و برای ذرات بالاتر از ۱۵ میکرون راندمان بالایی دارند. با توجه به اینکه در خشک کن پاششی طراحی شده حداکثر نرخ جداسازی پودر  $15 \text{ kg/h}$  است سیکلون آن در طبقه سیکلون‌های کوچک قرار می‌گیرد که می‌توان از سیکلون‌های نوع TSN-15Y استفاده کرد (۱). شاخص شناسایی سیکلون‌ها قطر اصلی آنها است در نتیجه قدم اول در طراحی سیکلون محاسبه قطر اصلی D است، که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$D = [L / (900\pi w_n)]^{0.5} \quad (13)$$

$L$  = نرخ هوای ورودی به سیکلون ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$w_n$  = سرعت هوا در مقطع ورودی سیکلون ( $\text{m/s}$ ) که از رابطه (۱۴) به دست می‌آید (۱).

$$w_n^2 = (2g/\xi) * (\Delta p/\rho) \quad (14)$$

معمولاً برای محاسبه سیکلون‌ها از نسبت  $\Delta p/\rho$  استفاده می‌کنند که برای هر سیکلونی یک مقدار مطلوب دارد. برای سیکلون‌های نوع TSN مقدار آن برابر  $75-50 \text{ m}$  می‌باشد. مقدار  $\xi$  نیز برای سیکلون مورد نظر با ورودی پیچان  $170$  می‌باشد (۱).

با قراردادن مقادیر فوق در رابطه (۱۴) مقدار  $w_n$  برابر  $2/40 \text{ m/s}$  به دست می‌آید. نرخ هوای ورودی به سیکلون نیز همان نرخ هوای خشک کن است که برابر  $650 \text{ m}^3/\text{h}$  می‌باشد. با قرار دادن داده‌های به دست آمده در رابطه (۱۵) قطر اصلی سیکلون  $310 \text{ m}$  به دست می‌آید. پس از تعیین قطر اصلی سیکلون بقیه ابعاد مهم آن با استفاده از نسبت‌های استاندارد که در منابع مختلف آمده به شرح زیر محاسبه می‌شود (۱۰،۷).

$$h1 = \text{ارتفاع قسمت ورودی} = D/2 = 155 \text{ mm}$$

$$h0 = \text{ارتفاع قسمت خروجی} = 1.5D = 465 \text{ mm}$$

$$h2 = \text{ارتفاع قسمت استوانه ای سیکلون} = 2D = 620 \text{ mm}$$

$$h3 = \text{ارتفاع قسمت مخروطی سیکلون} = 2D = 620 \text{ mm}$$

#### ۲-۲-۴ محاسبه افت فشار

برای برآورد دقیق از مقدار انرژی لازم برای تولید هوا توسط فن و دستیابی به مشخصات اساسی فن مانند افت فشار و دبی هوای ورودی به فن لازم است افت فشار هوا در کل سیستم محاسبه شود. معمولاً افت فشار در تمامی طول مسیر جریان هوا وجود دارد و اغلب در طول کانال‌ها زانوها، اتصالات و درازجای مختلف خشک کن وجود دارد (۲).

خشک کن پاششی یک مجموعه بسته است که از یک فن در مسیر خروجی هوا به عنوان فن مکنده استفاده می‌شود، بنابراین وجود افت فشار در طول مسیر باعث می‌شود که هوای کافی برای گرم کردن خشک کن حاصل نشود. اجزایی که در خشک کن پاششی در مسیر عبور جریان هوا قرار دارند عبارتند از: سیکلون، محفظه خشک کن، گرمکن، لوله و اتصالات که برای هر یک از آنها بایستی افت فشار محاسبه شود. مجموع تمامی افت‌های اجزای مختلف، افت فشار کل خشک کن را تشکیل می‌دهد. با استفاده از جداول و نمودارهای اصطکاکی مربوطه (۲) افت فشار اجزاء مختلف خشک کن محاسبه شد که مجموع آنها ۱۲۳ میلی‌متر آب به دست می‌آید.

#### ۲-۲-۵ انتخاب فن

در خشک کن پاششی نرخ جریان هوا معمولاً از طریق فن‌های سانتریفوژ مهیا می‌شود. با یک فن بعد از سیکلون کل خشک کن تحت فشار منفی زیادی کار می‌کند. بیشترین نوع فن‌های خشک کن پاششی از نوع سانتریفوژ با پره خمیدگی به عقب<sup>۱</sup> می‌باشند. برای انتخاب فن دو مشخصه دبی هوا و فشار کاری لازم است. یکی از بهترین روش‌های انتخاب فن شاخص بی بعد سرعت ویژه و استفاده از جداول موجود است (۴). مقدار  $Ns$  از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$N_s = \frac{1456 n V_Q^{0.5}}{p^{3/4}} \quad (19)$$

دبی حجمی مورد نیاز خشک کن با احتساب ضریب ۱/۵، برابر  $18/0 \text{ m}^3/\text{s}$  به دست می‌آید. با  $P$  فشار استاتیکی کل ۱۲۱۰ پاسکال و  $n$  سرعت دورانی فن  $2720 \text{ rpm}$ ، سرعت ویژه فن از رابطه (۱۹) تقریباً ۸۱۹۰ به دست می‌آید و با توجه به دفترچه‌های راهنمای فن‌های موجود یک فن سانتریفوژ عقب‌گرد و با قطر محفظه  $422 \text{ mm}$  انتخاب می‌شود.

#### ۲-۲-۶ انتخاب اتمایزر

اتمایزرهای مورد استفاده در خشک کن‌های پاششی نیمه صنعتی معمولاً دو نوع دوار یا نازلی

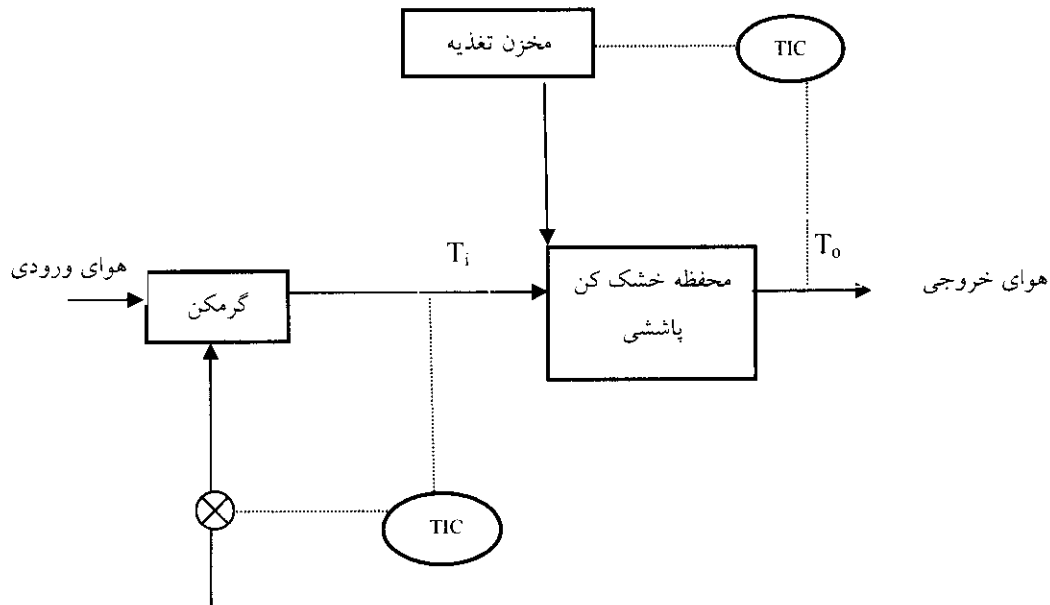
هستند. در نوع اتمایزر دوار مایع تغذیه به مرکز چرخشی که در حال دوران است انتقال می‌یابد و به کناره‌های چرخ رفته و با نیروی گریز از مرکز به شکل قطره مسی ریزد. اتمایزرهای دوار بسیار انعطاف پذیر بوده و فشار کمی برای انتقال مایع به آنها لازم است و می‌توان از آنها برای مواد مختلف و با خصوصیات فیزیکی متفاوت استفاده نمود (۲۴،۲۵).

با توجه به ابعاد محفظه خشک کن یک اتمایزر دوار برای خشک کن طراحی شده انتخاب می‌شود. اتمایزر دوار انتخاب شده مطابق مشخصات اتمایزر مدل APV : C F-100 می‌باشد. اتمایزر مذکور دارای دیسکی به قطر ۱۰۰ mm و با ۸ شیار به قطر ۴ mm و دور بیشینه ۲۵۰۰۰ rpm می‌باشد (۲۸). سرعت خطی قطره پرتاب شده از کناره‌های دیسک با استفاده از رابطه (۲۰) با حداکثر سرعت اتمایزر ۲۵۰۰۰ rpm تقریباً ۱۳۰ m/s به دست آمد.

$$V_i = \pi dN \quad (20)$$

### ۲-۲-۷ طراحی سیستم کنترلی

اساس سیستم کنترلی در خشک کن‌های پاششی بردو نوع استوار است. در یک سیستم دمای هوای خروجی با تنظیم گرمکن کنترل می‌شود و نرخ تغذیه ثابت نگه داشته می‌شود. این سیستم بیشتر برای اتمایزرهای نوع نازلی به کار می‌رود. در سیستم دیگری دمای هوای ورودی با تنظیم گرمکن کنترل می‌شود و دمای هوای خروجی با تنظیم مقدار مایع تغذیه کنترل می‌شود. این سیستم برای اتمایزرهای دوار به کار می‌رود (۱۹،۲۸). برای خشک کن ساخته شده از سیستم کنترل نوع دوم استفاده شده است. فلوچارت این سیستم کنترلی به صورت شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳- فلوچارت سیستم کنترل اصلی خشک کن

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است دمای هوای خروجی اندازه‌گیری شده و به نشانگر دما منتقل می‌شود. اختلاف دما از مقدار تنظیم شده با تغییر میزان تغذیه کنترل می‌شود. هوای گرم ورودی قبل از ورود به محفظه خشک‌کن اندازه‌گیری می‌شود و به نشانگر و ترموکنترلر انتقال می‌یابد و ترموکنترلر اختلاف دما را از مقدار تنظیم شده با تغییر مقدار سوخت مشعل گرم‌کن تنظیم و کنترل می‌کند. مدار طراحی شده برای سیستم کنترلی خشک‌کن پاششی شامل حسگرها، نشانگرها، کنترل‌کننده‌ها و راه‌اندازها می‌باشد.

- حسگرها: شامل حسگرهای دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی، دمای دیواره‌ها و دور اتمایزر.

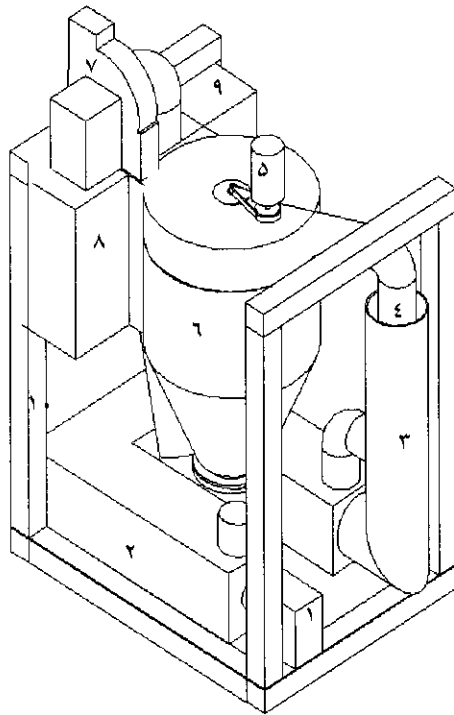
- کنترل‌کننده‌ها: شامل ترموکنترلرهای دمای هوای ورودی، دمای دیواره‌ها و کنترل‌کننده‌های دور اتمایزر و دور فن.

- راه‌اندازها: شامل کلیدهای قطع و وصل فن، گرم‌کن و مشعل اتمایزر و روشنایی.

## ۲-۳ ساخت خشک‌کن پاششی

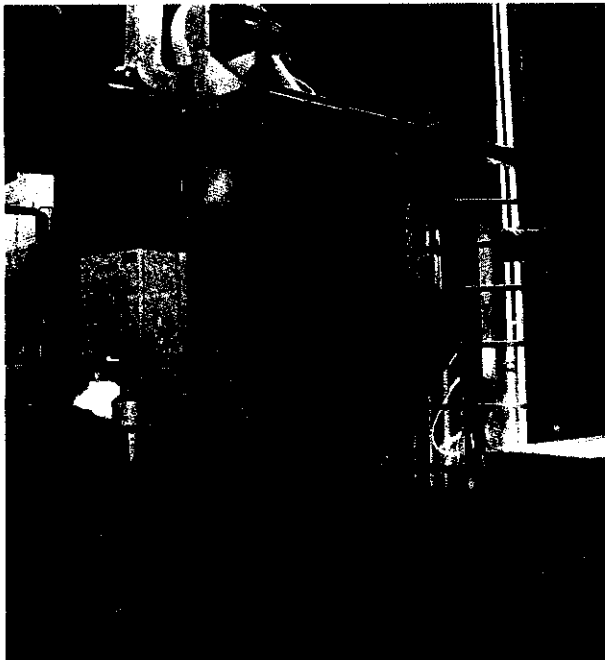
پس از طراحی و محاسبه اجزای خشک‌کن تمامی نقشه‌های جزء تهیه و پس از انتخاب مواد دستگاه ساخته شد. نکته مهمی که در ساخت خشک‌کن مورد توجه بوده است انعطاف پذیری آن است به طوری که می‌توان کل مجموعه را دمونتاز و تغییرات احتمالی را روی آن انجام داد. همچنین برای محصولات مختلف با استفاده از هوای خنک یا هوای گرم می‌توان جداره محفظه را خنک و یا گرم نمود. مراحل ساخت خشک‌کن با ساخت سازه نگه‌دارنده شروع شد و مخازن اصلی بر روی آن نصب گردید. بقیه قسمت‌های خشک‌کن شامل: گرم‌کن، سیکلون، مخزن تغذیه و اتمایزر ساخته شد و با نصب آنها روی سازه نگه‌دارنده مراحل ساخت و نصب اتصالات و لوله‌گذاری انجام گرفت. در نهایت سیستم کنترلی و تابلو فرمان ساخته و روی خشک‌کن نصب گردید. شکل (۴) نقشه سه بعدی و نمونه ساخته شده خشک‌کن پاششی را نشان می‌دهد.

از ویژگی‌های دستگاه مزبور می‌توان به امکان تغییر پارامترهایی نظیر دمای دیواره محفظه خشک‌کن، دمای هوای ورودی، دبی هوای ورودی، دور اتمایزر در محدوده وسیع ۳۰۰۰rpm تا ۲۵۰۰۰، دوجداره بودن محفظه خشک‌کن و کنترل دمای دیواره در محدوده دمای چسبندگی پودر اشاره کرد. استفاده از مواد استیل مناسب مواد غذایی در محفظه خشک‌کن، سیکلون، مخزن تغذیه و گرم‌کن، انعطاف پذیر بودن خشک‌کن هم برای کارهای نیمه صنعتی و هم آزمایشگاهی، امکان استفاده از دستگاه مزبور برای اکثر آبمیوه‌ها با دمای خشک شدن مختلف و مواد غذایی حساس به گرما نیز از جمله خصوصیات این خشک‌کن می‌باشد.



- ۱- مشعل
- ۲- گرمکن
- ۳- آگروز خروجی
- ۴- لوله هوای ورودی به محفظه
- ۵- موتور اتمایزر
- ۶- محفظه خشک‌کن
- ۷- فن
- ۸- محل قرارگیری مخزن
- ۹- محل قرارگیری سیکلون
- ۱۰- سازه نگهدارنده

(الف)



(ب)

شکل ۴- خشک‌کن پاششی طراحی شده: الف- نقشه سه‌بعدی ب- نمونه ساخته شده

## ۴-۲ ارزیابی خشک کن

برای بررسی عملکرد<sup>۱</sup> خشک کن پاششی ساخته شده آزمون‌هایی بر اساس آزمایش کامل فاکتوریل با طرح پایه کامل تصادفی در ۳ سطح دمای هوای ورودی و ۳ سطح مقدار تغذیه و با ۳ تکرار برای آب پرتقالی با درصد کنسانتره ۵۰٪ انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از اندازه‌گیری خصوصیات پودر پرتقال و خشک‌کن

نرخ تغذیه (ml/min)	دمای هوای ورودی (°C)	دمای هوای خروجی (°C)	اندازه ذرات پودر (µm)	رطوبت پودر (%)	متوسط دمای دیواره (°C)	رسوب دیواره (%)	عملکرد خشک‌کن (%)
۱۵۰	۱۳۰	۷۶	۴۶/۱۵	۳/۱۷	۴۰	۷	۸۵
۱۵۰	۱۴۰	۸۰	۴۶/۱۸	۳/۱۲	۳۹	۶	۸۹
۱۵۰	۱۵۰	۸۴	۴۶/۶۷	۳/۰۸	۴۰	۵	۹۰
۲۵۰	۱۳۰	۷۴	۵۱/۴۵	۳/۳۰	۳۷	۱۰	۸۲
۲۵۰	۱۴۰	۸۵	۵۱/۸۵	۳/۲۵	۳۷	۸	۸۵
۲۵۰	۱۵۰	۸۹	۵۳/۱۸	۳/۲۶	۳۸	۶	۸۷
۳۵۰	۱۳۰	۷۰	۶۲/۷۹	۳/۴۰	۳۵	۱۵	۶۵
۳۵۰	۱۴۰	۷۸	۶۳/۸۵	۳/۳۵	۳۶	۱۲	۷۰
۳۵۰	۱۵۰	۸۱	۶۷/۱۸	۳/۳۵	۳۶	۱۰	۷۵

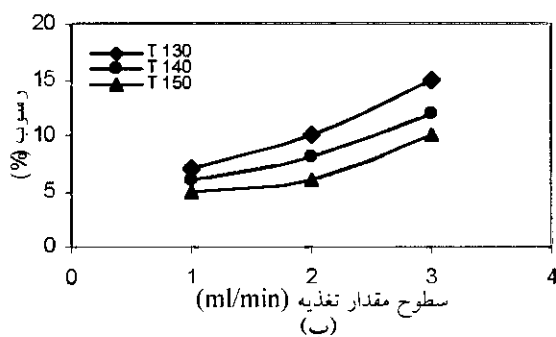
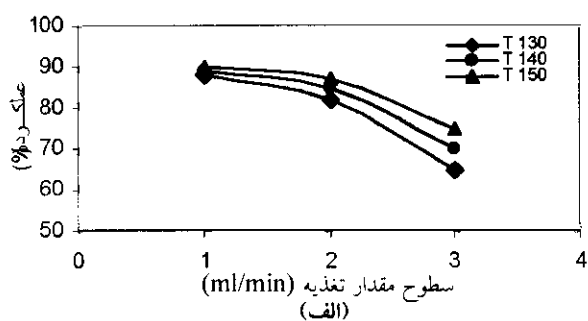
نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که عملکرد خشک کن در دماهای هوای ورودی مختلف بیشتر از ۶۵٪ می‌باشد. خصوصیات پودر اندازه‌گیری شده نیز نشان می‌دهد که پودر پرتقال تولیدی دارای اندازه ذرات کمتر از ۷۰ میکرون می‌باشد و پودر حاصل در طبقه پودرهای اندازه متوسط قرار می‌گیرد (۱۹). درصد رطوبت باقیمانده پودر تولیدی زیر ۴٪ است که در محدوده ۴-۲٪ ذکر شده در طراحی می‌باشد. متوسط دمای دیواره در تمام دماهای هوای ورودی در زیر دمای نقطه چسبندگی پودر (۴۴°C) قرار گرفته است و با توجه به درصد رسوب پایین دیواره‌ها می‌توان گفت که سیستم خشک‌کننده دیواره به صورت قابل توجهی در کاهش رسوب دیواره‌ها نقش داشته است.

نتایج تجزیه واریانس آزمون‌های انجام شده با خشک کن پاششی ساخته شده در جدول ۳ و نتایج اثرات متقابل نرخ تغذیه و دمای هوای ورودی بر عملکرد و رسوب پودر در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر تک تک و متقابل پارامترهای نرخ تغذیه و دمای هوای بر عملکرد و رسوب پودر در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشد.

۱- نسبت مقدار پودر تولیدی به مقدار جامد مایع تغذیه

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس عملکرد و رسوب دیواره

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییرات
رسوب دیواره	عملکرد خشک‌کن		
۳۹۰۶/۱۹۴***	۲۸۹۶/۳۳۳***	۲	A: مقدار تغذیه
۲۵۸/۱۸۵***	۵۹۶/۶۳۰***	۳	B: دمای هوای ورودی
۳۹/۹۳۵***	۳۳/۹۶۳***	۶	A*B
۰/۶۳۹	۱/۶۱۱	۲۴	خطا
**احتمال در سطح ۱٪		۳۵	جمع



شکل ۵- اثر متقابل نرخ تغذیه و دمای هوای ورودی بر عملکرد و رسوب

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است در یک دمای هوای ورودی ثابت با افزایش نرخ تغذیه، عملکرد کاهش و رسوب دیواره افزایش یافته است. در یک دبی هوای ورودی و سرعت دورانی ثابت اتمایزر، وقتی که نرخ تغذیه افزایش می‌یافت مقدار مایع بیشتری وارد محفظه می‌شد

طوری که در ابتدا سطح داخلی دیواره‌ها خیس می‌شد و باعث می‌شد ذرات پودر به همدیگر و دیواره‌ها بچسبند و باعث افزایش رسوب دیواره و کاهش عملکرد خشک‌کن شوند.

### ۳- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایشات اولیه با خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی نشان می‌دهد که: مناسب‌ترین دمای تغذیه برای آب پرتقال هنگام پاشش  $35^{\circ}\text{C}$  -  $20^{\circ}\text{C}$ ، بیشترین دمای هوای ورودی  $170^{\circ}\text{C}$ ، دمای آتش سوزی  $420^{\circ}\text{C}$  و دمای هوای خروجی  $70^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. دمای نقطه چسبندگی پودر آب پرتقال بارطوبت ۲٪،  $44^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. عامل اصلی رسوب دیواره‌ها در خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی دمای زیاد دیواره‌های محفظه خشک‌کن می‌باشد.

براساس نتایج حاصل از آزمایشات اولیه با خشک‌کن آزمایشگاهی، خشک‌کن پاششی نیمه صنعتی-آزمایشگاهی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. خشک‌کن طراحی و ساخته شده با ظرفیت تولید  $15\text{ kg/h}$  دوجداره بوده و قابلیت کنترل پارامترهای کاری را دارد. ابعاد محفظه خشک‌کن دارای ارتفاع  $90\text{ cm}$ ، قطر  $125\text{ cm}$  و زاویه مخروطی  $60^{\circ}$  و قطر اصلی سیکلون  $310\text{ mm}$  می‌باشد. اتمایزر دوار ساخته شده دارای دیسکی به قطر  $100\text{ mm}$  و با ۸ شیار به قطر  $4\text{ mm}$  و دور بیشینه  $25000\text{ rpm}$  می‌باشد. در سیستم کنترلی طراحی و ساخته شده دمای هوای ورودی با تنظیم گرمکن و دمای هوای خروجی با تنظیم مقدار مایع تغذیه کنترل می‌شود.

از ویژگی‌های دستگاه مزبور: امکان تغییر پارامترهایی نظیر دمای دیواره جانبی محفظه خشک‌کن، دمای هوای ورودی، دبی هوای ورودی، دور اتمایزر و کنترل دمای دیواره در محدوده دمای چسبندگی پودر می‌باشد. انعطاف پذیر بودن خشک‌کن هم برای کارهای نیمه صنعتی و هم آزمایشگاهی، امکان استفاده از دستگاه مزبور برای اکثر آبمیوه‌های مختلف و مواد غذایی حساس به دمای زیاد از جمله خصوصیات این خشک‌کن می‌باشد.

ارزیابی خشک‌کن پاششی نشان می‌دهد که عملکرد خشک‌کن در دماهای هوای ورودی مختلف بیشتر از ۶۵٪ می‌باشد. خصوصیات پودر اندازه‌گیری شده نیز نشان می‌دهد که پودر پرتقال تولیدی دارای اندازه ذرات کمتر از  $70\text{ میکرون}$  می‌باشد، و پودر حاصل در طبقه پودرهای اندازه متوسط قرار می‌گیرد. درصد رطوبت باقیمانده پودر تولیدی زیر ۴٪ است. متوسط دمای دیواره در تمام دماهای هوای ورودی در زیر دمای نقطه چسبندگی پودر ( $44^{\circ}\text{C}$ ) بود و با توجه به درصد رسوب پایین دیواره‌ها می‌توان گفت که سیستم خنک‌کننده دیواره به صورت قابل توجهی در کاهش رسوب دیواره‌ها نقش داشته است.

نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که دو پارامتر دمای هوای ورودی و نرخ تغذیه به صورت تکی و متقابل اثر معنی داری بر عملکرد خشک‌کن و رسوب دیواره‌ها دارند و در یک دمای هوای ورودی ثابت با افزایش نرخ تغذیه عملکرد کاهش و رسوب دیواره‌ها افزایش می‌یابد.



مقایسه خشک کن پاششی آزمایشگاهی و خشک کن ساخته شده نشان می‌دهد که درخشک کن پاششی ساخته شده با افزایش دمای هوای ورودی عملکرد افزایش یافته است و بیشترین عملکرد ۹۰٪ در دمای ۱۵۰°C به دست آمده است. درخشک کن پاششی آزمایشگاهی با افزایش دمای هوای ورودی عملکرد خشک کن کاهش یافته است و در دمای هوای ورودی ۱۵۰°C عملکرد ۲۷٪ به دست آمده است. درخشک کن آزمایشگاهی افزایش دمای هوای ورودی باعث افزایش دمای دیواره‌ها می‌شود ولی درخشک کن پاششی ساخته شده دمای دیواره‌ها در محدوده دمایی زیر نقطه چسبندگی پودر پرتقال قرار داده شده است و همین امر باعث کاهش رسوب و افزایش عملکرد خشک کن شده است. درخشک کن آزمایشگاهی مقدار رسوب دیواره‌ها ۶۵-۱۴٪ و عملکرد ۲۷-۸۵٪ به دست آمد در صورتی که درخشک کن پاششی ساخته شده مقدار رسوب دیواره‌ها ۱۵-۵٪ و عملکرد ۹۰-۶۵٪ می‌باشد.

#### ۴- فهرست علائم

- A = سطح محفظه خشک کن ( $m^2$ )
- $C_p$  = گرمای ویژه پودر ( $kJ/kg^{\circ}C$ )
- $C_{pair}$  = ظرفیت گرمایی ویژه ( $kJ/kg^{\circ}C$ )
- D = قطر اصلی سیکلون (m)
- d = قطر دیسک (m)
- $E_v$  = ظرفیت تبخیر ( $kg H_2O/h$ )
- F = نرخ تغذیه ( $kg/h$ )
- g = شتاب جاذبه زمین
- $H_E$  = گرمای لازم برای تبخیر ( $kcal/h$ )
- $H_P$  = گرمای لازم برای گرم کردن پودر ( $kcal/h$ )
- h = ارتفاع قسمت استوانه‌ای محفظه خشک کن (m)
- K = ضریب انتقال حرارت ( $kcal/m^2h^{\circ}C$ )
- L = نرخ هوای ورودی ( $kg/h$ )
- $L_o$  = نرخ هوای خروجی ( $kg/h$ )
- n = سرعت دورانی فن (rpm)
- N = دور دیسک (rpm)
- $N_s$  = سرعت ویژه
- P = فشار (pa) (در رابطه ۱۹)
- $P_p$  = مقدار پودر تولیدی ( $kg/h$ )
- Q = بار حرارتی ( $kJ/h$ )
- $Q_a$  = بار حرارتی واقعی گرمکن ( $kJ/h$ )
- $Q_L$  = افت‌های حرارتی محفظه خشک کن ( $kcal/h$ )
- T = دما در نقطه مورد نظر ( $^{\circ}C$ )
- $T_{amb}$  = دمای هوای محیط ( $^{\circ}C$ )

$$T_f = \text{دمای مایع تغذیه } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_i = \text{دمای هوای ورودی } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_o = \text{دمای هوای خروجی } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_p = \text{دمای محصول } (^{\circ}\text{C})$$

$$t_R = \text{زمان اقامت (s)}$$

$$V_Q = \text{دبی حجمی } (\text{m}^3/\text{s})$$

$$V_t = \text{سرعت خطی قطره } (\text{m/s})$$

$$V = \text{حجم محفظه } (\text{m}^3)$$

$$V_o = \text{حجم هوای خروجی } (\text{m}^3)$$

$$W_n = \text{سرعت هوا در مقطع ورودی سیکلون } (\text{m/s})$$

$$\Delta p = \text{مقاومت آئرو دینامیکی سیکلون } (\text{N/m}^2)$$

$$\Delta T = \text{اختلاف دمای ورودی و خروجی از گرمکن } (^{\circ}\text{C})$$

$$\eta = \text{راندمان گرمکن } (\%)$$

$$\lambda = \text{گرمای نهان تبخیر } (\text{kcal/kg})$$

$$\xi = \text{ضریب آئرو دینامیکی}$$

$$\rho = \text{چگالی هوا } (\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_a = \text{چگالی هوای خروجی از محفظه خشک کن } (\text{kg/m}^3)$$

## منابع و مآخذ:

- ۱- لطفیانی، ع (۱۳۶۷). غبارگیری و تصفیه گازها (تالیف گوردن پیساخوف)، چاپ اول، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۴۸۷ ص.
- ۲- ملک زاده، غ. کاشانی، ح. (۱۳۸۱). انتقال حرارت جک فیلیپ هولمن. (تالیف جک هولمن)، انتشارات آستان قدس رضوی، ۶۴۸ ص.
- 3- Bhandari, B. R, Senoussi, A., Dumoulin, E.D. and Lebert, A. (1993). Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology*, 11(5): 1081-1092.
- 4- Bleier, P. F. (1998). *Fan handbook*. New York, McGraw Hill. USA.
- 5- Brennan, J. G., Herrera, J. and Jowitt, R. (1971). A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice. *Journal of Food Technology*, 6:295-307.
- 6- Brennan, J. G. (1994). *Food dehydration A dictionary and guide*. Butterworth Heinemann, London, England.
- 7- Coker, A. K. (1993). Understand cyclone design. *Chemical Engineering Progress*, 89(12): 51-55.
- 8- Dolinsky, A., Grov, A. (1986). Method of production vegetable and fruit powders. USSR Patent N 1270511.
- 9- Dolinsky, A., Maletskaya, K. and Snezhkin, Y. (2000). Fruit and vegetable Powder production technology on the base of spray and convective drying methods. *Drying Technology*, 18(3): 747-758.
- 10- Furuta, T., Hatashi, H. and Ohashi, T. (1994). Some criteria of spray dryer design for food liquid. *Drying Technology*, 12(1&2):151-177.
- 11- Grandison, A. S. and Lewis, M. J. (1996). *Separation Processes in the food and biotechnology industries*. Woolhead Publishing Ltd, Cambridge, England.
- 12- Gupta, A. S. (1978). Spray drying of orange juice. US Patent No 4112130.

- 
- 13- Hansen, O. (2001). Method of spray drying. U. S. Patent. 6,253,463.
  - 14- Hennigs, C. Kockel, T.K. and Langrish, T. A. G. (2001). New measurements of the sticky behavior of skim milk powder. *Drying Technology*, 19(3&4): 471-7-484.
  - 15- Kabanov, L. (1985). Drying of fruit juices and puree by the spraying method. *Information Bul.*, Moscow, USSR.
  - 16- Kjaergaard, O. G. (1974). Effects of latest developments on design and practice of spray drying. Niro Atomizer Ltd, [On-line]. Available on the [www.niro.dec](http://www.niro.dec).
  - 17- Leith, D. (1973). Cyclone performance & design. *Atmospheric Environmental Journal*, 7:125-132.
  - 18- Masters, K. (1991). Impact of spray dryer design on powder properties. *Drying'91*: 56-73.
  - 19- Masters, K. (1991). *Spray drying*, 5th ed, Longman Scientific Technical, London, England.
  - 20- Maurice G. (1998). *Practical Dehydration*. 2<sup>nd</sup>, Woolhead Publishing Ltd, Cambridge, England.
  - 21- Mujumdar, A. S. (1987). *Handbook of industrial drying*. 2<sup>nd</sup>, New York, Marcel Dekker, USA.
  - 22- Mujumdar, A. S. (2000). *Drying technology in agriculture and food sciences*. Enfield Science Publishers, USA.
  - 23- Perry, R. H. and Green, D. (1999). *Chemical engineers handbook*. 7<sup>th</sup>, Mc Grawhill, New York, USA.
  - 24- Pisecky, J. (1979). Spray drying atomizer wheel. U.S. Patent. 4,141,783
  - 25- Pisecky, J. (1992). Process and spray drying apparatus for producing stable particle agglomerates. U. S. Patent. 5, 100, 509.
  - 26- Salcedo, R.L.R and Canido, M.G. (2001). Global optimization of reverse flow gas cyclones: application to small-scale cyclone desing. *Sepration science and Technology*, 36(12): 2707-2731.
  - 27- Stanley, M. W. (1990). *Chemical process equipment selection and design*. Butterworth-Heinemann, London, England.
  - 28- Stefan V. S. (2001). *Apv dryer handbook*. Available on the [www.apv.com](http://www.apv.com).
  - 29- Ting, S. V. and Russell, L.R. (1986). *Citrus fruits and their products*. New York, Marcel Dekker, USA.
  - 30- Zbicinski, I and Strumillo, C. (2002). Drying kinetics and particle residence time in spray drying. *Drying Technology*. 20 (9): 1751-1768.