

# طراحی خشک کن پاششی برای تولید پودر گوجه فرنگی

وهب قلعه خندابی<sup>۱</sup>، علیرضا فضلعلی<sup>۲\*</sup>، مجتبی ذوالفقاری<sup>۳</sup>

۱- دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه اراک

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه اراک

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۴

پیام‌نگار: a-fazlali@araku.ac.ir

## چکیده

در این تحقیق به اصول و قواعد طراحی خشک‌کن‌های پاششی و تأثیر پارامترهای فرایندی بر عملکرد خشک‌کن پرداخته‌ایم. برای به‌دست آوردن داده‌های اولیه طراحی، از نتایج تحقیقات قبلی و آزمایش‌هایی بهره گرفته شد که با خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی بر گوجه‌فرنگی صورت گرفته است. در پی مطالعات گسترده یک نمونه آزمایشی خشک‌کن پاششی مجهز به محفظه انتهای مخروطی شکل و به ظرفیت تولید پودر ۵۰ kg/h، ظرفیت تبخیر ۲۹۳ kgH<sub>2</sub>O/h و آهنگ تغذیه ۳۴۳ kg/h طراحی شد. از اتمایزهای دوار با جریان همسو برای پاشش خوراک و سیکلون برای جداسازی پودر از هوای خروجی بهره گرفته شد. گرمکن نامستقیم برای گرم کردن جریان هوا و هواکش سانتریفوژ عقب گرد برای تأمین آهنگ جریان هوا پیشنهاد شدند.

کلیدواژه‌ها: پودر گوجه‌فرنگی، خشک کردن، خشک‌کن پاششی، طراحی.

## ۱. مقدمه

محفظه خشک‌کن متأثر می‌شود. بنابراین طراحی یک سامانه خشک‌کن صحیح بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی مواد از نکات مهم در طراحی آن به‌شمار می‌آید [۳]. با توجه به این‌که آب‌میوه‌ها از خواص گرمانرمی و آبدوستی برخوردارند، خیلی سریع روی دیواره‌های جانبی خشک‌کن رسوب می‌کنند بنابراین، برای تولید پودر آب‌میوه‌ها با خشک‌کن پاششی باید از وسایل اضافی دیگری در محفظه خشک‌کن، مانند دیواره‌های خنک شده، هوای خنک کن ثانویه و جاروی هوایی بهره گرفت [۴].

خواستگاه خشک‌کن پاششی ایالات متحده امریکاست، زیرا اولین طراحی در سال ۱۸۷۲ در آنجا ثبت شده است. جنگ جهانی دوم، رویداد تأثیرگذاری بر تاریخچه خشک‌کن پاششی به حساب می‌آید، زیرا این فرایند تولید پیوسته پودر شیر در صنایع لبنی را در انحصار

امروزه گرایش به مصرف پودرهای گوجه‌فرنگی که کیفیت مشابه میوه اصلی دارند، شتابانی در حال گسترش است. دوام و ماندگاری میوه گوجه‌فرنگی در شرایط محیطی کوتاه‌مدت است و از سوی دیگر نگهداری آن از طریق آبیگری به‌دلیل تغییر ساختار و شکل گوجه‌فرنگی، روش توصیه شده‌ای برای افزایش قابلیت انبارمانی این میوه نیست [۱ و ۲].

یکی از خشک‌کن‌هایی که برای تولید پودر آب‌میوه‌ها به کار گرفته شده خشک‌کن پاششی است. کیفیت پودر خشک شده در خشک‌کن پاششی تا حد زیادی از نحوه پاشش مایع و انتقال جرم و حرارت بین مایع پاشیده شده و هوای گرم در داخل

\* اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

برای بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر تولید پودر گوجه‌فرنگی در حین عملیات خشک کردن پاششی استفاده کردند. برای این کار از یک خشک‌کن پاششی با محفظه خشک‌کن به قطر 800 mm، ارتفاع استوانه 600 mm و زاویه مخروطی  $60^\circ$  از جنس استیل ضد زنگ مجهز به اتمایزر دوار با سرعت 25000 تا 35000 دور بر دقیقه و پمپ پریستالتیک با دبی 8 تا 16 میلی‌لیتر بر دقیقه بهره بردند [10].

گوئلا<sup>5</sup> و همکاران، عملکرد یک خشک‌کن پاششی را برای تولید پودر گوجه‌فرنگی با استفاده از خشک کردن پاششی خمیر گوجه‌فرنگی (غلظت جامدات کل  $0.14 \pm 0.05$ ) بررسی کردند. به این منظور، یک خشک‌کن پاششی در مقیاس آزمایشی، با محفظه خشک‌کن به قطر 10/5 cm، ارتفاع استوانه 43 cm، زاویه مخروطی  $60^\circ$  از جنس شیشه ضخیم شفاف و مجهز به اتمایزر نازل دوسیاله (قطر داخلی 0/5 mm) با جریان همسو به کار گرفتند. در این بررسی، پارامترهای ثابت: فشار اتمایزر 5/1 bar، دبی جریان خوراک 1/75  $\pm$  0/05 g/min و دمای خوراک 32/0  $\pm$  0/5  $^\circ\text{C}$  و پارامترهای متغیر: دمای هوای ورودی 140، 130، 120، 110  $^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس به اضافه و منهای یک درجه، دبی جریان هوای خشک‌کن ( $22/75 \pm 0/18$  m<sup>3</sup>/h و 21/00، 19/25، 17/50) و دبی جریان هوای متراکم ( $800 \pm 20$  l/h و 700، 600، 500) بوده‌اند و دمای هوای خروجی 66 تا 86 درجه سلسیوس به اضافه فرض‌های یک درجه به‌طور پیوسته بر روی مانیتور به نمایش در آمده است [20-11].

سوزا<sup>6</sup> و همکاران طراحی آزمایش فاکتوریل کامل را به منظور تعیین تأثیر متغیرهای فرایندی بر خواص فیزیکی پودر خمیر گوجه‌فرنگی به کار بردند. آنان برای تحقق این هدف از خشک‌کن پاششی مقیاس پایلوت با محفظه خشک‌کن به قطر 2/5 m و ارتفاع استوانه 1/4 m از جنس استیل ضد زنگ مجهز به اتمایزر دوار با جریان هوای همسو استفاده کردند. شرایط عملیاتی ثابت در آزمایش‌های آنان دمای هوای خروجی 90  $^\circ\text{C}$  و سرعت دمنده 30000 rpm بود. بنابر نتایج به‌دست آمده، دمای هوای ورودی، آهنگ جریان خوراک و سرعت اتمایزر تأثیر مثبتی بر مقدار رطوبت، چگالی ظاهری و اندازه ذرات دارند و بر تخلخل و چگالی واقعی چندان تأثیری ندارند. بهترین

خود درآورد [5]. در این نوع خشک‌کن‌ها، از یک دستگاه افشانه اتمایزر استفاده می‌شود. این دستگاه مخلوط نرم و یکنواخت حاصل از ماده غذایی از پیش تغلیظ شده را به صورت قطرات بسیار ریز در می‌آورد و سپس به داخل محفظه مخروطی شکل خشک‌کن منتقل می‌کند. همزمان با ورود ماده غذایی به داخل خشک‌کن، هوای داغ نیز به این محفظه منتقل می‌شود و در داخل خشک‌کن‌ها هوای داغ نیز جریان می‌یابد. دمای هوای داغ مورد استفاده در این محفظه بالا و در حدود 150 تا 300 درجه سلسیوس است. در اغلب خشک‌کن‌های پاششی، ماده غذایی خشک شده از سطح زیرین مخروط جمع‌آوری و در نهایت روی یک نقاله به خارج از خشک‌کن منتقل می‌شود [6].

## ۲. بررسی پژوهش‌های پیشین

لازار<sup>1</sup> از خشک‌کن پاششی برای تولید پودر گوجه‌فرنگی استفاده کرد. این خشک‌کن دارای دو چرخانه (سیکلون) بود و پودرها پس از تخلیه از چرخانه اولیه به چرخانه ثانویه انتقال داده و دوباره با هوای گرم خشک می‌شدند [7]. کجرگارد<sup>2</sup> نتیجه گرفت که یکی از دشوارترین محصولات که به پودر تبدیل می‌شود آب گوجه‌فرنگی است و پودر آن بسیار چسبنده است که به ماهیت گرمانرمی و آبدوستی آن بر می‌گردد. او پیشنهاد کرد که برای خشک کردن آب گوجه‌فرنگی با خشک‌کن پاششی استفاده از یک دیوار خنک شده مخصوص و کنترل دمای دیواره در یک حد مشخص به خشک کردن آن کمک می‌کند [8].

بانات<sup>3</sup> و همکاران از یک پایلوت پلنت خشک‌کن پاششی مجهز به اتمایزر دوار و پمپ پریستالتیک در محدوده دبی 8 تا 16 میلی‌لیتر بر دقیقه برای تولید پودر گوجه‌فرنگی استفاده کردند. آنان پی بردند که افزایش جامدات کل خوراک سبب افزایش جامدات کل پودر، اندازه ذرات، چگالی توده و کاهش حلالیت آنها می‌شود؛ در حالی که افزایش آهنگ جریان خوراک به کاهش جامدات کل پودر و حلالیت می‌انجامد، و اندازه متوسط ذرات و چگالی توده را افزایش می‌دهد [9].

ال‌آشه<sup>4</sup> و همکاران از روش طراحی آزمایش فاکتوریل در دو سطح

1. Lazar
2. Kjaergaard
3. Banat
4. Al-Asheh

5. Goula  
6. Souza

۱. جمع‌آوری اطلاعات طراحی: دمای خوراک و مقدار جامد در آن، آهنگ محصول و تبخیر، رطوبت؛
۲. بررسی خواص خوراک: گرمای نهان فرار، گرانی، حساسیت گرمایی، خواص جامد؛
۳. تشخیص شرایط خطرناک خوراک: حلال و خواص آن، نقطه اشتعال، سمیت؛
۴. فهرست کردن خواص محصول خشک: توزیع اندازه پودر، شکل ذره، چگالی توده، گرمای ویژه، دمای انتقال شیشه‌ای، چسبندگی، قابلیت اشتعال پودر؛
۵. تعیین شرایط هوا: رطوبت نسبی، دما و فشار محیط؛
۶. انتخاب سیستم خشک‌کن پاششی: چیدمان فرایند (باز، بسته و شبه بسته)، نوع تماس هوا-پاشش (همسو، غیر همسو و مختلط)، روش پاشش (دوار یا نازلی)؛
۷. انتخاب محفظه خشک‌کن: بر اساس اتمایزر و چیدمان فرایند؛
۸. انتخاب گرمکن هوا، نوع سوخت و ارزش گرمایی آن: گرمکن بخار یا الکتریکی، کوره نفتی؛
۹. انتخاب روش جمع‌آوری محصول: چرخانه صافی کیسه‌ای، نظیف‌کننده‌تر؛
۱۰. معادلات انتقال جرم و انرژی.

قطراتی که با هوای داغ در تماس اند، با گرفتن گرما از هوا رطوبت خود را از دست می‌دهند و در نتیجه دما و رطوبت قطره تغییر می‌کند. تغییرات جرم قطره برحسب زمان از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{dm_p}{dt} = -f A_p K_g (Y_{eq} - Y) \quad (1)$$

که در آن  $Y_{eq}$  رطوبت تعادلی،  $Y$  رطوبت هوا،  $K_g$  ضریب انتقال جرم و  $A_p$  سطح ذرات است. ضریب  $f$ ، بنابر تعریف، عبارت است از نسبت شدت خشک شدن در مرحله نزولی به شدت خشک شدن در مرحله ثابت. در واقع، ضریب  $f$  عامل تصحیح نیروی محرکه انتقال جرم است.

برای محاسبه تغییرات دمای ذره حین خشک شدن، آگاهی از مقدار انرژی انتقال یافته از هوای داغ به ذره و مقدار انرژی لازم برای تبخیر و تغییر دمای ذره لازم است. معادله (۲) رابطه بین این انرژی‌ها را برقرار می‌کند:

$$K_H A_p (T_g - T_p) = -\frac{dm_p}{dt} \lambda + m_p C_p \frac{dT_p}{dt} \quad (2)$$

شرایط خشک کردن پاششی به منظور تولید پودر با رطوبت کمتر و چگالی ظاهری بیشتر در دمای هوای ورودی  $200^\circ\text{C}$ ، دبی جریان خوراک  $276\text{ g/min}$  و سرعت اتمایزر  $3000\text{ rpm}$  حاصل شد [۲۱]. سیدیک<sup>۱</sup> و گانش رفتار فرایند خشک کردن گوجه‌فرنگی را در یک خشک‌کن پاششی با ظرفیت خروجی  $5\text{ kg/h}$  و مجهز به اتمایزر دوار انجام دادند. شرایط بهینه برای بیشینه بازبافت پودر گوجه‌فرنگی در دمای هوای ورودی  $160^\circ\text{C}$ ، دمای خروجی  $90^\circ\text{C}$ ، اضافه کردن  $40\text{ gr}$  مالتودکسترین به ازای هر  $1$  لیتر خمیر تازه ( $0.8$ ) و با دبی جریان خوراک  $80\text{ mil/min}$  مشاهده شد [۲۲]. دوریژن<sup>۲</sup> و همکاران خواص فیزیکی-شیمیایی پودر گوجه‌فرنگی تولید شده توسط خشک‌کن پاششی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که اضافه کردن مالتودکسترین موجب افزایش زمان خشک کردن از  $8\text{ min}$  به  $12\text{ min}$ ، افزایش دمای انتقال شیشه‌ای، افزایش  $95\%$  حلالیت مدت زمان کوتاه‌تر پراکندگی از  $30\text{ S}$  می‌شود. آنها در این مطالعه از خشک‌کن پاششی با بیشینه ظرفیت اسمی  $3.1\text{ h}^{-1}$ ، مجهز به اتمایزر نازل دوسپاله بهره بردند. شرایط عملیاتی از این قرار بوده است: دبی جریان خوراک:  $1\text{ h}^{-1}$ ؛ دبی جریان هوای ورودی:  $2/70\text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ ؛ دمای هوای ورودی  $150 \pm 1^\circ\text{C}$ ؛ دمای هوای خروجی  $99 \pm 3^\circ\text{C}$  [۲۳].

### ۳. طراحی خشک‌کن پاششی

خشک‌کن پاششی در وجه جابجایی عمل می‌کند و اساس کار آن براساس حذف رطوبت با کاربرد گرم کردن محصول خوراک و کنترل رطوبت محیط خشک کردن استوار است [۲۴]. طراحی خشک‌کن پاششی به طور وسیعی تحت تأثیر مشخصات خوراک ورودی به خشک‌کن و خواص محصول نهایی قرار می‌گیرد. از پارامترهای مهندسی مورد نیاز برای طراحی می‌توان به پارامترهایی چون: آهنگ انتقال جرم و حرارت به ازای هر سقوط یک قطره، نسبت ارتفاع به قطر برای محفظه‌های خشک‌کن، عملکرد اتمایزر، بازده اختلاط اسپری، گاز خشک‌کن و زمان اقامت اشاره کرد.

### ۴. روش و الگوریتم طراحی

مراحل زیر، به ترتیب، در طراحی یک سیستم خشک‌کن پاششی باید صورت گیرد [۲۵]:

1. Siddick
2. Durigon

## ۵-۱ مشخصات فرایند

در تمامی آزمایش‌ها (دمای هوای محیط  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $25^{\circ}\text{C}$ ) پارامترهای فشار اتمایزر ( $5 \pm 0.1$  bar)، دبی خوراک ( $1.75 \pm 0.05$  g/min) و دمای تغذیه ( $32 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) ثابت نگه داشته شد. آزمایش‌های اولیه روی گوجه‌فرنگی با درصد جامد  $14 \pm 0.05$  و با  $4$  سطح دمای هوای ورودی  $110-140 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ،  $4$  سطح دبی جریان هوای خشک‌کن  $17.5-22.75 \pm 0.18$  m<sup>3</sup>/h و  $4$  سطح دبی جریان هوای متراکم شده  $500-800 \pm 20$  L/h انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه از این قرار به‌دست آمده است:

۱. دمای هوای ورودی: دمای هوای ورودی براساس حساسیت محصول به دما و دمای آتش سوزی محصول انتخاب می‌شود. دمای هوای ورودی بیشینه در آزمایش‌های اولیه برای خشک کردن گوجه‌فرنگی ( $110-200^{\circ}\text{C}$ )  $200^{\circ}\text{C}$  است. دمای آتش سوزی برای مواد غذایی نیز حدود  $420^{\circ}\text{C}$  است [۶]. معمولاً در طراحی خشک‌کن پاششی بیشترین دمای هوای ورودی ممکن را که کمتر از دمای آتش‌سوزی باشد در نظر می‌گیرند؛ بنابراین بیشینه دمای هوای ورودی مورد نیاز در طراحی  $200^{\circ}\text{C}$  انتخاب می‌شود.

۲. دمای هوای خروجی: دمای هوای خروجی بر اساس درصد رطوبت مورد نیاز پودر و تخلیه راحت آن از محفظه انتخاب و با میزان آهنگ تغذیه کنترل می‌شود. کمینه دمای خروجی به‌دست آمده از آزمایش‌های اولیه برای تولید پودری با رطوبت  $4-11\%$ ، ( $65-100^{\circ}\text{C}$ )  $65^{\circ}\text{C}$  است.

۳. دمای تغذیه: اختیار کردن دمای تغذیه باید چنان باشد که بین گرانیوی گوجه‌فرنگی و سالم ماندن آن تعادل برقرار باشد. دمای تغذیه گوجه‌فرنگی نباید از  $65^{\circ}\text{C}$  بیشتر شود [۴۱]. اضافه کردن دما حتی برای مدت زمان کوتاهی، باعث تخریب و از بین رفتن محصول می‌شود. دمای تغذیه در زیر  $5^{\circ}\text{C}$  نیز انتقال و پاشش محصول را دشوار می‌کند. بنابراین، برای انتقال آسان مواد تغذیه‌ای، جلوگیری از خراب شدن و مناسب بودن گرانیوی، دمای متوسط تغذیه هنگام پاشش ( $20-70^{\circ}\text{C}$ )  $35^{\circ}\text{C}$  است؛ در این دما مایع دارای گرانیوی مناسبی است و برای خشک شدن نیز به دمای کمتری نیاز دارد [۴۱].

که در آن جمله حرارت انتقالی عبارت است از مجموع گرمای تبخیر و حرارت مورد نیاز برای تغییر دما؛

۱۱. آهنگ جریان هوا برای خشک کردن، ظرفیت گرمکن؛

۱۲. تخمین زمان اقامت قطره‌ها در محفظه خشک‌کن؛

۱۳. انتخاب‌های دیگر: سیستم‌های کنترل، پمپ‌ها، هواکش‌ها، ابعاد و اتصالات لوله.

با توجه به مراحل موجود خشک‌کن‌های پاششی برای تولید محصولات به صورت پودر، در نظر گرفتن موارد زیر برای طراحی آنها امری ضروری است:

- تلمبه‌کردن خوراک (پیش تغلیظ [۲۶] و کمک خشک‌کن [۲۷ و ۲۸]);
- انتخاب اتمایزر (اصول و قواعد پاشش، طبقه بندی اتمایزرها [۵]، توزیع ابعاد ذرات [۲۹] و شکل هندسی ذرات خشک شده [۲۸]);
- طراحی محفظه خشک‌کن (سرعت خشک شدن، انتقال حرارت و جرم [۲۹-۳۲]، مسیر حرکت قطرات [۳۳]، الگوی جریان، تعداد مراحل، نوع چیدمان و نسبت ظاهری)؛
- سیستم‌های تخلیه پودر و هوا؛
- تجهیزات جانبی (گرمکن [۲۹ و ۳۴]، هواکش و جداساز پودر)؛
- سیستم‌های کنترلی؛
- پارامترهای تماس اسپری- هوا و تبخیر (زاویه پاشش، سرعت هواکش، دمای هوای ورودی [۳۵] و خروجی [۳۶]، دمای انتقال شیشه‌ای [۳۷]، غلظت کمک خشک‌کن [۳۸] و زمان اقامت ذرات در محفظه خشک‌کن [۳۹]).

## ۵. داده‌های اولیه طراحی

برای طراحی خشک‌کن پاششی، داشتن اطلاعات دقیق از رفتار خشک شدن، مانند شرایط دمایی خشک شدن، شرایط پاشش، زمان اقامت و خواص محصولی که باید خشک شود، نظیر حساسیت به گرما و چسبندگی مواد، ضروری است. اطلاعات یادشده یا از نتایج تحقیقات قبلی و یا با بهره‌گیری از آزمایش‌های اولیه با خشک‌کن‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آید [۴۰]. بنابراین، برای طراحی و ساخت خشک‌کن، از نتایج تحقیقاتی که گونلا و همکاران انجام داده‌اند، سود جسته شد [۲۰-۱۱].

نازلی باریکتر و بلندتر ساخته می‌شود [۶]. محفظه باید چنان طراحی شود که بتواند شرایط صحیح برای حفظ کیفیت مطلوب محصول را فراهم آورد. نحوه جریان هوا و پاشش تغذیه در خشک شدن محصولات مختلف نقش بسزایی دارد [۴۰]. لازمه دستیابی به ابعاد محفظه خشک‌کن، مشخص کردن نوع سامانه جریان هوا-پاشش و محاسبه آهنگ هوای خشک کردن و زمان اقامت است [۲۴]. با توجه به نوع محصول، سامانه جریان هوا-پاشش همسو انتخاب می‌شود و برای محاسبه آهنگ هوای خشک کردن از موازنه جرم و حرارت در خشک‌کن استفاده می‌شود.

#### ۱-۱-۶ محاسبه انتقال جرم و حرارت

آهنگ هوای خشک‌کن (L) مجموع گرمای لازم برای تبخیر رطوبت، گرم کردن پودر و افت دمای محفظه است که از این قرار محاسبه می‌شود:

$$L = \frac{H_E + H_p + Q_L}{0.245 (T_i - T_o)} \quad (5)$$

گرمای مورد نیاز برای تبخیر ( $H_E$ ) با در نظر گرفتن گرمای نهان تبخیر ( $\lambda$ ) ۵۶۵ kcal/kg [۲۴]، دمای هوای خروجی ( $T_o$ ) ۶۵ °C و دمای تغذیه ( $T_p$ ) ۳۵ °C از رابطه (۶)، به میزان ۱۶۹۵۸۸ kcal/h به دست می‌آید:

$$H_E = E_v [\lambda + 0.46(T_o - T_f)] \quad (6)$$

گرمای لازم برای گرم کردن پودر ( $H_p$ ) با گرمای ویژه پودر ( $C_p$ ) ۰/۹۵ kcal/kg°C [۲۴]، دمای تغذیه ( $T_p$ ) ۳۵ °C و دمای پودر ( $T_p$ ) ۴۰ °C از رابطه (۷)، به میزان ۲۳۸ kcal/h به دست می‌آید:

$$H_p = P_p C_p (T_p - T_f) \quad (7)$$

در خشک‌کن‌های پاششی با جریان همسو و اتمایزر دوار، نسبت ارتفاع به قطر محفظه خشک‌کن بین ۰/۶ تا ۱ است [۲۴]. با توجه به نمونه‌های موجود و محاسبات سعی و خطا، محفظه خشک‌کنی با ابعاد  $H/D = 0.83 \times 2/5m$  و زاویه مخروطی  $60^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، با سطح محفظه خشک‌کن ( $A$ )  $23/5 m^2$  و ضریب

دمای نقطه چسبندگی پودر: با توجه به حساسیت گوجه‌فرنگی به دما، در دمایی به نام دمای نقطه چسبندگی، ذرات پودر گوجه‌فرنگی به هم می‌چسبند که باعث تخریب و از بین رفتن محصول می‌شود. اطلاع از این دما در تعیین دیواره‌های جانبی محفظه ضروری است [۴۲]. دمای نقطه چسبندگی پودر به دست آمده از آزمایش‌ها، ۴۰ °C است.

۵. زمان اقامت: مدت زمان لازم برای خشک شدن کامل محصول که معمولاً بر حسب متوسط زمان اقامت هوای خشک شدن فرض می‌شود و در طراحی ابعاد محفظه خشک‌کن لازم است [۴۳]. برای آبیوه‌ها این زمان ۱۰ تا ۲۰ ثانیه به دست آمده است [۲۸].

#### ۲-۵ مشخصه‌های کلی طراحی خشک‌کن

طراحی خشک‌کن پاششی مورد نظر در این تحقیق برای گوجه‌فرنگی با درصد جامد تغذیه ۱۴٪ انجام گرفته است و هدف آن تولید پودر گوجه‌فرنگی با درصد رطوبت باقیمانده ۴٪ و به مقدار ۵۰ kg/h پودر است. بر اساس این داده‌ها، ظرفیت تبخیر و آهنگ تغذیه مورد نیاز خشک‌کن از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$P_p = \frac{E_v S_f}{S_{p0} - S_f} \quad (3)$$

$$F = \frac{E_p S_{p0}}{S_{p0} - S_f} \quad (4)$$

با مقدار پودر تولیدی ( $P_p$ ) معادل ۵۰ kg/h، جامد تغذیه ( $S_f$ ) معادل ۱۴٪ و جامد پودر ( $S_{p0}$ ) معادل ۹۶٪، ظرفیت تبخیر ( $E_v$ ) از رابطه (۳) ۳۴۳ kgH<sub>2</sub>O/h و آهنگ تغذیه ( $F$ ) از رابطه (۴) ۳۴۳ kgH<sub>2</sub>O/h به دست می‌آید. البته، شرایط یادشده برای حداکثر کارایی خشک‌کن است و برای محصولات مختلف و با شرایط متفاوت فرق می‌کند.

#### ۶. طراحی اجزای خشک‌کن

##### ۱-۶ طراحی محفظه خشک‌کن

وظیفه اصلی محفظه خشک‌کن، احاطه یا محصور کردن فرایند عملیاتی پاشش است. برای اتمایزرهای دوار معمولاً محفظه خشک‌کن قطور و با انتهای مخروطی یا تخت و برای اتمایزرهای

### ۶-۲ انتخاب اتمایزر

اتمایزرهای به کار رفته در خشک کن های پاششی نیمه صنعتی معمولاً دو نوع دوار یا نازلی اند. در نوع اتمایزر دوار مایع تغذیه به مرکز چرخ می رود و با نیروی مرکز گریز به شکل قطره می ریزد. اتمایزرهای دوار بسیار انعطاف پذیرند و فشار کمی برای انتقال مایع به آنها لازم است و می توان از آنها برای مواد مختلف و با خواص فیزیکی متفاوت بهره گرفت [۴۶].

با توجه به ابعاد محفظه خشک کن، اتمایزر دواری برای خشک کن طراحی شده اختیار می شود. اتمایزر دوار انتخاب شده مطابق مشخصات اتمایزر مدل CMT: TC-20 است. اتمایزر یاد شده دارای قرصی به قطر ۱۲۰ mm و سرعت دور بیشینه ۲۵۰۰۰ rpm است. سرعت خطی قطره پرتاب شده از کناره های قرص با استفاده از رابطه (۱۳) با قطر ۱۲۰ mm (d) و حداکثر سرعت اتمایزر (N) ۲۵۰۰۰ rpm، ۱۵۷ m/s به دست می آید:

$$V_t = \pi dN \quad (13)$$

### ۶-۳ گرمکن

گرمکن بر اساس نوع محصولی اختیار می شود که باید خشک شود، با توجه به حساسیت گوجه فرنگی به گرما، گرمکن الزاماً باید از نوع نامستقیم باشد. داده های اولیه مورد نیاز در طراحی گرمکن عبارتند از: حجم هوای لازم برای گرم کردن، دمای اولیه هوا و بیشترین دمایی که هوا به آن باید برسد. مقدار حرارت یا بار حرارتی لازم برای گرم کردن هوا از رابطه (۱۴) به دست می آید [۴۷]:

$$Q = LC_{pair}(T_{oA} - T_{iA}) \quad (14)$$

با توجه به افت حرارتی اجزای مختلف خشک کن و مسیر عبور هوای گرم یک ضریب اطمینان ۱/۵ برای افت حرارتی در نظر گرفته می شود. در این صورت، آهنگ هوای لازم برای گرم کردن (L)، برابر است با آهنگ هوای خروجی ضرب در ۱/۵ که معادل ۸۵۲۵ kg/h به دست می آید.

دمای هوای اولیه ( $T_{iA}$ ) برابر حداقل دمای ناحیه قرارگیری خشک کن است که  $20^\circ\text{C}$  و حداکثر دمای لازم برای خشک کن

انتقال حرارت (K)  $9 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  برای جنس استیل، مقدار افت حرارتی محفظه ( $Q_L$ ) از رابطه (۸) معادل  $8460 \text{ kcal/h}$  به دست می آید:

$$Q_L = KA(T_o - T_{amb}) \quad (8)$$

با قرار دادن مجموع گرماهای یاد شده در بالا در رابطه (۵) آهنگ هوای خشک کن (L) معادل  $5390 \text{ kg/h}$  به دست می آید. آهنگ جرمی هوای خروجی خشک کن ( $L_0$ ) نیز از رابطه (۹) معادل  $5683 \text{ kg/h}$  به دست می آید:

$$L_0 = L + E_v \quad (9)$$

با دمای هوای خروجی (T) معادل  $63^\circ\text{C}$  چگالی هوا از رابطه (۱۰) به میزان  $1/0.130 \text{ kg/m}^3$  به دست می آید. در نتیجه آهنگ حجمی هوای خروجی خشک کن ( $V_0$ ) معادل  $5610 \text{ m}^3/\text{h}$  محاسبه می شود [۲۴]:

$$\rho_a = \frac{353L_0}{(T+273)(1.6E_v+L)} \quad (10)$$

### ۶-۱-۲ زمان اقامت

با در نظر گرفتن ابعاد اختیاری شده خشک کن، حجم محفظه خشک کن با زاویه مخروطی  $60^\circ$ ، از رابطه (۱۱) معادل  $24 \text{ m}^3$  به دست می آید [۲۴]:

$$V = 0.7854D_1^2(H_1 + 0.2886D_1) \quad (11)$$

زمان اقامت خشک شدن از رابطه (۱۲) معادل ۱۵ s به دست می آید [۴۴]. این زمان اقامت با نتایج به دست آمده از آزمایش های اولیه و نتایج محققین مطابقت دارد [۴۵]. بنابراین، ابعاد انتخابی محفظه خشک کن با ارتفاع  $2/5 \text{ m}$ ، قطر  $3 \text{ m}$  و زاویه مخروطی  $60^\circ$  ابعاد مناسبی به شمار می آید. برای جداره بیرونی نیز ابعاد با ارتفاع  $2/8 \text{ m}$ ، قطر  $3/1 \text{ m}$  و زاویه مخروطی  $60^\circ$  به دست آمد.

$$t_R = \frac{V}{V_0} \quad (12)$$

یک سیستم جداسازی پودر تعبیه شود. یکی از این نوع سیستم‌ها چرخانه‌ها هستند که در سطح گسترده‌ای برای جداسازی ذرات گرد و غبار به کار می‌روند و برای ذرات بالاتر از ۱۵ میکرون بازدهی بالایی دارند. با توجه به این که در خشک‌کن پاششی طراحی شده حداکثر آهنگ جداسازی پودر ۵۰ kg/h است، می‌توان از چرخانه‌های نوع TSN-15Y بهره گرفت. شاخص شناسایی چرخانه‌ها قطر اصلی آنهاست، در نتیجه قدم اول در طراحی چرخانه محاسبه قطر اصلی (D) است، که از رابطه (۱۷) به دست می‌آید [۵۰]:

$$D = \left[ \frac{L}{900\pi W_n} \right]^{0.5} \quad (15)$$

که  $L$  (m<sup>3</sup>/h) آهنگ هوای ورودی به سیکلون و  $W_n$  (m/s) سرعت هوا در مقطع ورودی سیکلون از رابطه (۱۸) به دست می‌آید [۵۰]:

$$W_n^2 = \left( \frac{2g}{\xi} \right) \left( \frac{\Delta P}{\rho} \right) \quad (18)$$

معمولاً برای محاسبه چرخانه‌ها از نسبت  $\Delta P/\rho$  استفاده می‌کنند که برای هر چرخانه‌ای یک مقدار مطلوب دارد. برای چرخانه‌های نوع TSN مقدار آن ۵۰ تا ۷۵ متر است. مقدار  $\xi$  نیز برای چرخانه مورد نظر با ورودی پیچان، ۱۷۰ است [۵۰].

با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه (۱۶)، مقدار  $W_n$  معادل ۳ m/s به دست می‌آید. آهنگ هوای ورودی به چرخانه نیز همان آهنگ هوای خشک‌کن معادل ۵۶۱۰ m<sup>3</sup>/h است. با قرار دادن داده‌های به دست آمده در رابطه (۱۷)، قطر اصلی چرخانه ۸۰ cm به دست می‌آید. پس از تعیین قطر اصلی چرخانه، بقیه ابعاد مهم آن با استفاده از نسبت‌های استاندارد که در منابع مختلف آمده، محاسبه می‌شود [۵۰].

#### ۷. طراحی سیستم کنترلی

کنترل خشک‌کن‌های پاششی می‌تواند با سیستم کنترل دستی یا سیستم کنترل خودکار باشد. کنترل دستی به خشک‌کن‌های پاششی کوچک و یا وقتی مواد به آسانی خشک شوند محدود می‌شود. در حالت‌های دیگر باید از کنترل خودکار استفاده کرد. دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن پارامتری

( $T_{0A}$ ) ۳۰۰ °C در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت گرمایی ویژه هوا از جدول‌های مربوطه معادل ۱/۰۲ kJ/kg°C است [۴۸]. بنابراین، مقدار بار حرارتی لازم برای گرمکن (Q) ۶۷۶ kW به دست می‌آید. مقدار بار حرارتی یا حرارت لازم برای گرم کردن هوای خشک‌کن به صورت واقعی با در نظر گرفتن بازده گرمکن از رابطه (۱۵) به دست می‌آید [۲۴]:

$$Q_a = \frac{Q}{\eta} \quad (15)$$

با توجه به دمای هوای خروجی ۳۰۰ °C، بازده گرمکن ۷۵٪ در نظر گرفته می‌شود. با احتساب بازده، بار حرارتی گرمکن مورد نیاز خشک‌کن  $Q_a=901$  kW به دست می‌آید.

#### ۶-۴ انتخاب هواکش

در خشک‌کن پاششی آهنگ جریان هوا معمولاً از طریق هواکش‌های سانتریفوژ مهیا می‌شود. با نصب یک هواکش بعد از چرخانه کل خشک‌کن تحت فشار منفی زیادی کار می‌کند. بیشترین نوع هواکش‌های خشک‌کن پاششی از نوع سانتریفوژ با پره خمیدگی به عقب‌اند. برای انتخاب هواکش دو مشخصه دبی هوا و فشار کاری لازم است. یکی از بهترین روش‌های انتخاب هواکش، شاخص بی بعد سرعت ویژه و استفاده از جدول‌های موجود است. سرعت ویژه از رابطه (۱۶) به دست می‌آید [۴۹]:

$$N_s = \frac{1456nVQ^{0.5}}{p^{3/4}} \quad (16)$$

دبی حجمی مورد نیاز خشک‌کن ( $VQ$ ) با احتساب ضریب ۱/۵، معادل ۲/۳ m<sup>3</sup>/s است. با فشار استاتیکی کل ۱۲۴۵ Pa (P) و سرعت دورانی هواکش معادل ۲۵۶۷ rpm (n)، سرعت ویژه هواکش ( $N_s$ ) از رابطه (۱۶) تقریباً ۲۷۰۴۴ به دست می‌آید و با توجه به دفترچه‌های راهنمای هواکش‌های موجود، یک هواکش سانتریفوژ عقب گرد و با قطر محفظه ۷۰۵ mm انتخاب می‌شود.

#### ۶-۵ طراحی سیستم جداساز پودر

برای جداسازی پودر از هوای خروجی خشک‌کن پاششی، باید

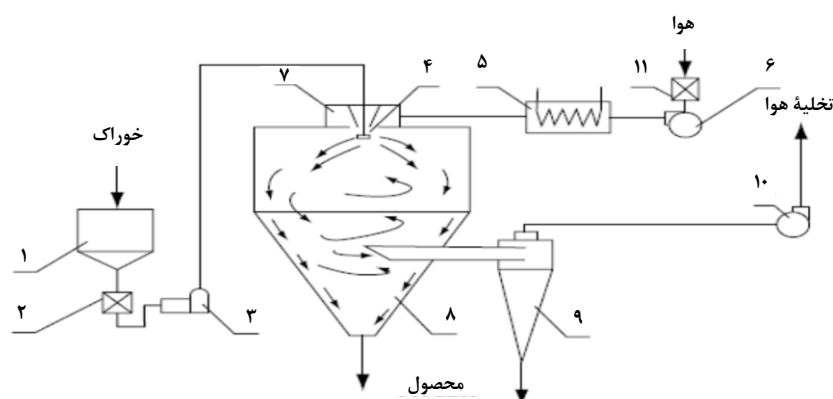
و کنترل کننده گرما، اختلاف دما را از مقدار تنظیم شده با تغییر مقدار سوخت مشعل گرمکن تنظیم و کنترل می کند.

است که چون بیانگر کیفیت محصول نهایی و راحتی در نشان دادن آن است، کنترل می شود.

برای خشک کن پاششی طراحی شده با اتمایزر دوار از سیستم کنترلی شامل دو مدار، استفاده می شود [۲۹]. مدار اول دمای هوای خروجی را از طریق تنظیم آهنگ احتراق کنترل می کند. دمای هوای ورودی از طریق آهنگ احتراق سوخت در مدار دوم کنترل می شود. دمای هوای خروجی اندازه گیری و به نشانگر دما منتقل می شود. اختلاف دما از مقدار تنظیم شده با تغییر میزان تغذیه کنترل می شود. هوای گرم ورودی قبل از ورود به محفظه خشک کن اندازه گیری و به نشانگر و کنترل کننده گرما انتقال می یابد

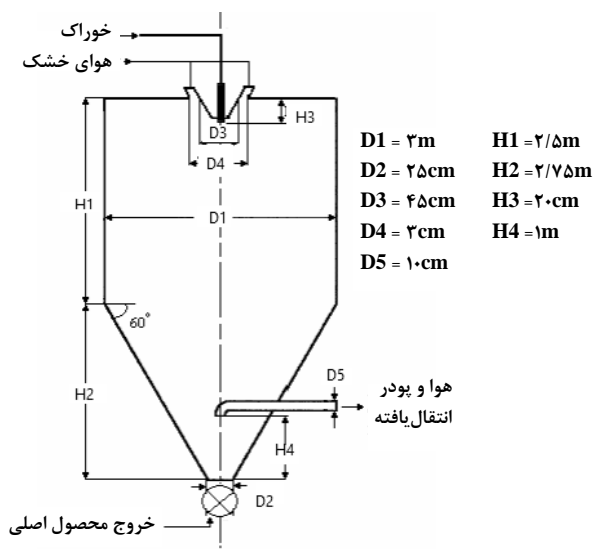
### ۸. ساختار و مشخصات خشک کن پاششی

چیدمان خشک کن پاششی طراحی شده را در شکل (۱) مشاهده می کنید و شکل های (۲) و (۳)، به ترتیب، بیانگر ابعاد محفظه خشک کن و چرخانه طراحی شده اند. مشخصه های خشک کن پاششی طراحی شده و پارامترهای تأثیر گذار بر فرایند خشک کردن پاششی گوجه فرنگی نیز در جدول های (۱) و (۲) درج شده اند.



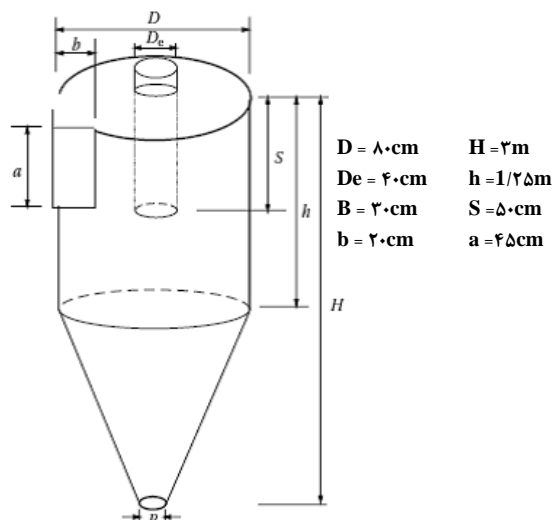
شکل ۱. چیدمان خشک کن پاششی طراحی شده:

۱. مخزن خوراک؛ ۲. صافی؛ ۳. پمپ تغذیه؛ ۴. اتمایزر دوار؛ ۵. گرمکن هوا؛ ۶. هواکش ورودی؛ ۷. توزیع کننده هوا؛ ۸. محفظه خشک کن؛ ۹. چرخانه؛ ۱۰. هواکش خروجی؛ ۱۱. صافی هوا.



شکل ۲. شکل نموداری و ابعاد محفظه خشک کن طراحی شده.





شکل ۳. شکل نموداری و ابعاد چرخه طراحی شده.

جدول ۱. مشخصات خشک کن پاششی SD-50.

مقادیر	مشخصات
۳۵۰	آهنگ تغذیه (kg/h)
۳۰۰	ظرفیت تبخیر (kg/h)
۵۰	پودر تولیدی (kg/h)
۵۴۰۰	آهنگ هوای خشک کن (kg/h)
۵۷۰۰	آهنگ جرمی جریان هوای خروجی از خشک کن (kg/h)
۵۶۰۰	آهنگ حجمی جریان هوای خروجی از خشک کن (m <sup>3</sup> /h)
۹۰۰	بار حرارتی گرمکن غیر مستقیم (kW)
۲۵۰۰۰ rpm	پاشنده
اتمایزر دوار مدل CMT: TC-20 با جریان همسو با قطر دیسک ۱۲۰ mm و دور بیشینه ۲۵۰۰۰ rpm	محفظه خشک کن
از جنس استنلس استیل با قطر ۳ m و ارتفاع ۲/۵ m	چرخانه
از نوع TSN-15Y به قطر اصلی ۸۰ cm	

جدول ۲. پارامترهای فرایندی خشک کن پاششی SD-50.

مقادیر	پارامترهای فرایندی
۲۰-۳۵	دمای خوراک (°C)
۴۰	دمای پودر (°C)
۲۰-۲۵	دمای محیط (°C)
۱۱۰-۲۰۰	دمای هوای ورودی (°C)
۶۵-۱۰۰	دمای هوای خروجی (°C)
۱-۵	فشار عملیاتی (atm)
۱۴-۵۰	درصد جامدات خوراک (%)
۴-۱۱	رطوبت پودر (%)
۳	سرعت هوا در مقطع ورودی سیکلون (m/s)
۱۵	زمان اقامت هوا در محفظه خشک کن (s)

- vegetable powder production technology on the base of spray and convective drying methods", *Drying Technol*, 18, 747-758, (2000).
- [5] Anandharamakrishnan, C., Padma Ishwarya, S., "Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation", 1<sup>st</sup> Ed, John Wiley & Sons, Ltd, (2015).
- [6] Mujumdar, A. S., "Handbook of Industrial Drying", 4<sup>th</sup> Ed, Taylor & Francis Group, LLC, (2014).
- [7] Brennan, J. G., Herrera, J., Jowitt, R., "A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice", *J. Food Sci. Technol.*, 6, 295-307, (1971).
- [8] Kjaergaard, O. G., Effects of latest developments on design and practice of spray drying, Niro Atomizer Ltd, (1974).
- [9] Banat, F., Jumah, R., Al-Asheh, S., Hammad, S., "Effect of Operating Parameter on the Spray Drying of Tomato Paste", *Eng. Life. Sci.*, 2, 403-407, (2002).
- [10] Al-Asheh, S., Jumah, R., Banat, F., Hammad, S., "The Use of Experimental Factorial Design for Analyzing the Effect of Spray Dryer Operating Variables on the Production of Tomato Powder", *ICChemE*, 81, 81-88, (2003).
- [11] Goula, A. M., Adamopoulos K. G., "Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: II. Powder Properties", *Drying Technol*, 26, 726-737, (2008).
- [12] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: I. Drying Kinetics and Product Recovery", *Drying Technol*, 26, 714-725, (2008).
- [13] Goula, A. M., Karapantsios, T. D., Adamopoulos, K. G., "Characterization of Tomato Pulp Stickiness during Spray Drying using a Contact Probe Method", *Drying Technol*, 25, 591-598, (2007).
- [14] Goula, A. M., Karapantsios, T. D., Achilias, D. S., Adamopoulos, K. G., "Water Sorption Isotherm and Glass Transition Temperature of Spray Dried Tomato Pulp", *J. Food. Eng.*, (2007).
- [15] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Stability of Lycopene during Spray Drying of Tomato Pulp", *LWT*, 38, 479-487, (2005).
- [16] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Spray Drying of Tomato Pulp: Effect of Feed Concentration", *Drying Technol*, 22, 2309-2330, (2004).
- [17] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., Nikolaos, A. K., "Influence of Spray Drying Conditions on Tomato Powder Properties", *Drying Technol*, 22, 1129-1151, (2004).
- [18] Adamopoulos, K. G., Goula, A. M., "Influence of Spray Drying Conditions on Residue Accululation-Simulation Using CFD", 53<sup>rd</sup> Canadian Chemical Engineering Conference in Hamilton, Ontario, Canada, October 26-29, (2003).

## ۹. نتیجه‌گیری کلی

استفاده از آب‌میوه‌های طبیعی همواره مشکلات و ضایعات زیادی را ناشی از نگهداری و حمل و نقل به بار می‌آورد. گرفتن آب‌میوه برای تولید پودر، به دلیل حساسیت زیاد این مواد به دما، یکی از دشوارترین روش‌های خشک کردن مواد غذایی به‌شمار می‌آید. در این میان، رب گوجه‌فرنگی محصولی است که در حالت گرم، متمایل به چسبناکی و نرمی و به علت ویژگی گرم‌انرژی حالت یکپارگی به خود می‌گیرد و به سختی خشک می‌شود. در این بررسی، به طراحی خشک‌کن پاششی پرداختیم که قابلیت خشک کردن مواد حساس به دما به صورت همیشگی و به مقدار بسیار زیاد برای خشک کردن گوجه‌فرنگی را دارند.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده و مذکور در مراجع، خشک‌کن پاششی نیمه صنعتی با ظرفیت تولید ۵۰ kg/h طراحی شد. ابعاد محفظه خشک‌کن دارای ارتفاع ۲/۵ m، قطر ۳ m و زاویه مخروطی ۶۰° و قطر اصلی چرخانه ۸۰ cm است. اتمایزر دوار پیشنهادی دارای قرصی به قطر ۱۲۰ mm و دور بیشینه ۲۵۰۰۰ rpm است. از ویژگی‌های خشک‌کن پاششی طراحی شده می‌توان به امکان تغییر پارامترهایی چون دمای دیواره محفظه خشک‌کن، دمای هوای ورودی، دبی هوای ورودی، دور اتمایزر و کنترل دمای دیواره در محدوده دمای چسبندگی پودر اشاره کرد.

## ۱۰. سپاسگزاری

مؤلفان مقاله از شرکت دانش بنیان تکوین آزمایش پارسه (تاپکو اراک) به اعتبار همکاری بی دریغشان در انجام این پژوهش بسیار سپاسگزارند.

## مراجع

- [1] Davoodi, M., Vijayanand, P., Kulkarni S. G., Ramana, K. V. R., "Effect of different pretreatments and dehydration methods on quality characteristics and storage stability of tomato powder", *LWT*, 40, 1832-1840, (2007).
- [2] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties", *J. Food. Eng.*, 66, 35-42, (2005).
- [3] Hansen, O., "Method of spray drying", U.S Patent, 6, 253-463, (2001).
- [4] Dolinsky A., Maletskaya K., Snezhkin, Y., "Fruit and

- [19] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Influence of Spray Drying Conditions on Tomato Powder Moisture", 3<sup>rd</sup> International Symposium on Food Rheology and Structure in Zurich, Switzerland, February 9-13, (2003).
- [20] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., "Spray drying performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation", *Drying Technol*, 21, 1273-1289, (2003).
- [21] Souza, A. S., Borges, S. V., Magalhaes, N. F., Ricardo, H. V., Cereda, M. P., Daiuto, E. R., "Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato", *Cienc Tecnol Aliment Campinas*, 29, 291-294, (2009).
- [22] Abubacker Siddick, S., Ganesh, S., "Spray drying parameters for the maximum recovery of fruit powder from different tomato varieties grown in Dindigul District", *IJSRP*, (2013).
- [23] Durigon, A., De Souza, P. G., Carciofi, B. A. M., Laurindo, J. B., "Cast-Tape Drying of Tomato Juice for the Production of Powdered Tomato", *Food. Bioprod. Process*, (2016).
- [24] Masters, K., "Spray drying Handbook", 5<sup>th</sup> Ed, Gohn Wiley & Sons, Inc, New York, (1991).
- [25] Gauvain, W. H., Katta, S., "Basic Concepts of Spray Dryer Design", *AIChE J.*, 22, 713-724, (1976).
- [26] Chegini, R. G., Khazaei, J., Ghobadian, B., Goudarzi, A. M., "Prediction of process and product parameters in an orange juice spray dryer using artificial neural networks", *J. Food. Eng.*, 84, 534-543, (2008).
- [27] Jittanit, W., Niti-Att, S., Techanuntachikul, O., "Study of spray drying of pineapple juice using maltodextrin as an adjunct", *Chiang. Mai. J. Sci.*, 37, 498-506, (2010).
- [28] Bhandari, B. R., Snoussi, A., Dumoulin, E. D., Lebert, A., "Spray drying of concentrated fruit juices", *Drying Technol*, 11, 1081-1092, (1993).
- [29] Masters, K., "Spray Drying", Leonard Hill Books, London, U.K, (1979).
- [28] Vehring, R., "Pharmaceutical particle engineering via spray drying", *Pharm. Res.*, 25, 999-1022, (2008).
- [29] Patal, K, Chen, X. D., "Surface-center temperature differences within milk droplets during convective drying and drying-based Biot number analysis", *AIChE J.*, 54, 3273-3290, (2008).
- [30] Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D., Stapley, A. G. F., "Effects of process variables on the denaturation of whey proteins during spray drying", *Drying Technol*, 25, 799-807, (2007).
- [31] Adhikari, B., Howes, T., Lecomete, D., Bhandari, B. R., "A glass transition temperature approach for the prediction of the surface stickiness of a drying droplet during spray drying", *Powder Technol*, 149, 168-179, (2005).
- [32] Ranz, W. E., Marshal, W. R., "Evaporation from drops. Part 1", *Chem. Eng. Prog.*, 48, 141-146, (1952).
- [33] Katta, S., Gauvain, W. H., "Some Fundamental Aspects of Spray Drying", *AIChE J.*, 21, 143-153, (1975).
- [34] Katta, S., Gauvain, W. H., "Basic concepts of spray dryer design", *AIChE J.*, 22, 713-724, (1976).
- [35] Oldfield, D. J., Taylor, M. W., Singh, H., "Effect of preheating and other process parameters on whey proteins reactions during skim milk powder manufacture", *Int. Dairy. J.*, 15, 501-511, (2005).
- [36] Maas, S. G., Schaldach, G., Littringer, E. M., Mescher, A., Griesser, U. J., Braun, D. E., Walzel, P. E., Urbanetz, N. A., "The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol", *Powder Technol*, 213, 27-35, (2011).
- [37] Rahman, M. S., "Food properties handbook", CRC Press, Boca Raton, 1<sup>st</sup> Ed, 87-177, (1995).
- [38] Murugesan, R., Orsat, V., "Spray Drying for the Production of Nutraceutical Ingredients: A Review", *Food Bioprocess Technol*, 8, 1-12, (2011).
- [39] Kuriakose, R., Anandharamakrishnan, C., "Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in spray drying of food products", *Trends Food Sci Technol.*, 21, 383-398, (2010).
- [40] Furtuta, T., Hatashi, H., Ohashi, T., "Some criteria of spray design for food liquid", *Drying Technol*, 12, 151-177, (1994).
- [41] Gupta, A. S., "Spray drying of orange juice", US Patent No 4112130, (1978).
- [42] Hennigs, C., Kockel, T. K., Langrish, T. A. G., "New measurements of the sticky behavior of skim milk powder", *Drying Technol*, 19, 471-484, (2001).
- [43] Zbicinski, I., Strumilo, C., "Drying kinetics and particle residence time in spray drying", *Drying Technol*, 20, 1751-1768, (2002).
- [44] Masters, K., "Impact of spray dryer design on powder properties", *Drying*, 91, 56-73, (1991).
- [45] Dolinsky, A., Grov, A., "Method of production vegetable and fruit powders", USSR Patent N 1270511, (1986).
- [46] Pisecky, J., "Spray drying atomizer wheel", U.S Patent. 4,141,783, (1979).
- [47] Perry, R. H., Green, D., "Chemical Engineering Handbook", 7<sup>th</sup> Ed, McGraw Hill, New York, USA, (1999).
- [48] Atefi, M., Mehri, A., Akbari Oghaz, A. R., "Drying effects on quality of saffron", International symposium on saffron biology and biotechnology, (2003).
- [49] Bleier, P. F., "Fan Handbook", McGraw Hill, New York, USA, (1998).
- [50] Coker, A. K., "Understand cyclone design", *Chem. Eng. Prog.*, 89, 51-55, (1993).